



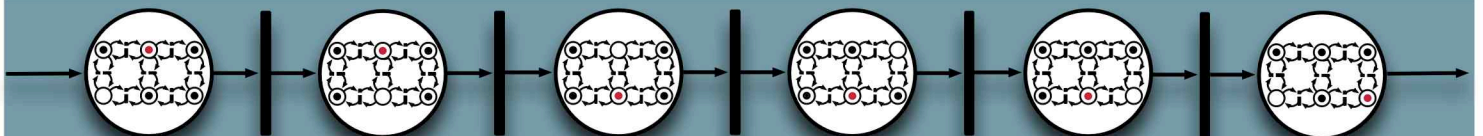
Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Verkehrssicherheit
und Automatisierungstechnik **iva**



Dipl.-Ing. Matthias Hübner

Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen



Dissertation, 2012

Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Matthias Hübner
aus (Geburtsort): Braunschweig

eingereicht am: 25.04.2012

mündliche Prüfung am: 27.06.2012

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder
Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker

Vorwort

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik entstand die vorliegende Dissertation. Sie ist als ein übergeordnetes Thema meiner dort wahrgenommenen Aufgaben aufzufassen, die unter anderem in der Fahrzeugautomatisierung in Form des Entwurfs von Regelungskonzepten sowie in der Fahrzeugortung lagen. In diesem Sinne setzt sie sich mit der Frage auseinander, wie mit sicheren Regelungssystemen sowie mit genauer Fahrzeugortung und hinreichender Fahrzeugkommunikation ein zukünftiger Straßenverkehr gestaltet werden kann. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt zunächst Herrn Professor Schnieder – Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik – für die fachlichen Ratschläge und die langjährige vertrauensvolle wissenschaftliche Begleitung als Doktorvater, welche letztlich in der Übernahme des Referats mündete.

Herrn Professor Söffker – Leiter des Lehrstuhls für Steuerung, Regelung und Systemdynamik der Universität Duisburg-Essen – danke ich für die Übernahme des Koreferats und für die nützlichen Hinweise zur Fertigstellung der Dissertation, die mir halfen, den Inhalt aus der Perspektive des Fachgebiets *Kognitive Systeme* zu betrachten und einzuordnen.

Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die Tipps zum Prüfungsablauf im vertrauensvollen Vorgespräch bedanke ich mich bei Herrn Professor Vietor – Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik.

Desweiteren bedanke ich mich bei allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, die meine Arbeit am Institut und das Entstehen meiner Dissertation mit beeinflusst haben.

Meinem langjährigen Zimmergenossen Herrn Dr.-Ing. Stefan Detering danke ich

für die angenehme Zusammenarbeit, sei es bei Laborversuchen als auch bei den zahlreichen Fachgesprächen.

Herrn Dipl.-Math. Tobias Lück gilt besonderer Dank für die vielen fachlichen und kreativen Diskussionen, die von einer einzigartigen Eigendynamik geprägt waren und die ersten wichtigen, gemeinsamen Veröffentlichungen zum Thema dieser Arbeit ermöglichten.

Das Leben in meiner letzten Wohn- und Arbeitsgemeinschaft am Institut mit Herrn Dipl.-Ing. Marco Wegener zeichnete sich ebenfalls durch einen kontinuierlichen und freundschaftlichen Gedankenaustausch zu allen Fragen der Ortung, der Messunsicherheit, der Automatisierungstechnik und des allgemeinen Weltgeschehens bei zig Espressi pro Tag aus. Viele so generierte Ideen konnten direkt in Veröffentlichungen umgesetzt werden oder trugen dazu bei, das Denken zu formen. Danke Marco, es war und ist mir immer eine Freude.

Der feste Halt in einer liebevollen Familie ist ein ebenso wichtiges Element in der Phase der Promotion. Daher danke ich meinen Eltern und meiner lieben Freundin sehr herzlich für all die Unterstützung in dieser Zeit und den konsequenten Glauben an meine Fähigkeiten. Besonders möchte ich mich nochmals bei meinem Vater für das Korrektorat des Textes bedanken.

Braunschweig, im Juli 2012

Matthias Hübner

Abstract

This contribution presents a concept of a future automated road traffic for highways, based on vehicle-local decision-making and car2car communication. Present road traffic is characterized by varying and deviant vehicles' and drivers' behavior, that results in phenomena as traffic jams and accidents. A homogenization of the vehicles' behavior shall be a remedy against this, by means of autonomous driving and communicating vehicles. Main objective is the development of a vehicle-local homogenous rule-base realizing a specified traffic behavior. For this purpose road traffic is modeled as an object system by means of Petri Nets, consisting of a system net and an object net. The system net represents the road network, whereas an object net is a representation of a vehicle formation. This concept is used to model different traffic scenarios. For each associated formation net the reachability graph is calculated and analyzed regarding target states and their shortest paths minimizing the predefined cost function. The shortest paths are equivalent to consecutive vehicle interactions, which are furthermore mapped to vehicle-local environmental parameters to construct a well-defined rule-base. For the coordination between the vehicles an associated communication protocol is generated and combined with consensus-algorithms to ensure stability of the vehicle formations. Result is a rule-base realizing a distributed vehicle control which inherently avoids accidents while utilizing full road capacity. According to this, a framework offers, besides support at the rule-base generation, the simulation of the resulting collective behavior of a scalable vehicle formation in certain traffic scenarios with high physical insight.

Intelligent Transportation Systems, Automatic Road Traffic, Cooperative Control, Multi Agent Systems, Petri Nets, Consensus Algorithms

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Konzeption eines zukünftigen automatisierten Straßenverkehrs für Autobahnen auf Basis von fahrzeuglokalen Entscheidungsmechanismen und Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Der derzeitige Straßenverkehr zeichnet sich durch unterschiedliches und deviantes Fahrzeug- bzw. Fahrerverhalten aus, dessen Konsequenz Phänomene wie Staus und Verkehrsunfälle sind. Die Homogenisierung des Fahrzeugverhaltens soll diese negativen Phänomene eliminieren und durch autonom fahrende Fahrzeuge, die untereinander kommunizieren können, realisiert werden. Hierzu ist der Entwurf einer fahrzeuglokalen homogenen Regelbasis erforderlich, die das spezifizierte Verkehrsverhalten realisiert. Zu diesem Zweck wird der Straßenverkehr als ein Objektsystem auf Basis von Petrinetzen mit zwei Ebenen modelliert. Die Straßennetzebene bildet das globale Verhalten einer Fahrzeuggruppe ab, während die Formationsnetzebene die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen repräsentiert. Durch Kombination von Straßen- und Formationsnetzen werden verschiedene Verkehrssituationen generiert. Mit den jeweils assoziierten Formationsnetzen wird eine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt. In jedem Erreichbarkeitsgraphen werden anschließend Zielzustände identifiziert und ein Pfad zu diesen ermittelt, der ein definiertes Gütemaß minimiert und konsekutiven Interaktionen der Fahrzeuge entspricht. Mittels der Analyse fahrzeuglokaler Umgebungsparameter werden die jeweiligen Aktionen der Fahrzeuge zu einer fahrzeuglokalen Regelbasis kombiniert. Zur Koordination der beteiligten Fahrzeuge wird auf dieser Basis ein Kommunikationsprotokoll definiert, das um Konsens-Algorithmen ergänzt wird, welche die Stabilisierung der Formationen sicherstellen. Resultat sind eine Regelbasis und ein Kommunikationsprotokoll, die als verteiltes Regelungssystem ein Verkehrsverhalten erzeugen, das die Straßenkapazität bestmöglich ausnutzt und Unfälle inhärent vermeidet. Ein Rahmenwerk ermöglicht neben der Unterstützung beim Entwurf der Regelbasis auch eine fahrphysikalische Simulation von Fahrzeuggruppen auf begrenzten Fahrbahnabschnitten, sodass das hieraus resultierende Verkehrsverhalten erkennbar wird.

Automatisierter Straßenverkehr, Kooperative Regelung, Multiagentensysteme, Petrinetze, Konsensalgorithmen, Intelligent Transportation Systems

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Signifikante Nachteile des derzeitigen Straßenverkehrs	1
1.2	Motivation für den Entwurf eines zukünftigen Straßenverkehrs	8
1.3	Systemische Einordnung des Straßenverkehrs	9
1.4	Zielsetzung und methodischer Ansatz	15
1.5	Aufbau der Arbeit	18
2	Methodischer Entwurf eines kooperativen Straßenverkehrs	21
2.1	Konzeptentwurf anhand der Konstituenten des Verkehrs	21
2.2	Konzept von Fahrzeugagenten	23
2.2.1	Zustand eines Fahrzeugagenten	26
2.2.2	Verhalten eines Fahrzeugagenten	42
2.2.3	Funktion eines Fahrzeugagenten	43
2.3	Fazit zur Konzeption eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Fahrzeugagenten	60
3	Stand der Forschung	63
3.1	Anwendungsorientierte Forschungsprogramme zur Verkehrsbeeinflussung	64
3.2	Multiagentensysteme und Verfahren kooperativer Regelungen	65
3.2.1	Multiagentensysteme im Rahmen eines kooperativen Straßenverkehrs	65
3.2.2	Konzeption und Entwurf kooperativer Regelungen im Rahmen von Multiagentensystemen	68
3.3	Vorarbeiten des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA)	73

3.3.1	Fahrzeugregelung	74
3.3.2	Modellierung und Analyse diskreter sowie stochastischer und hybrider Systeme	74
3.3.3	Steuerungssynthese diskreter und diskret-kontinuierlicher Sys- teme	75
3.3.4	Simulation und Optimierung	75
3.3.5	Kommunikationsmodellierung	76
3.3.6	Konzeption von Multiagentensystemen	76
3.4	Klassifikation und Auswahl von Beschreibungsmitteln für die Real- isierung der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten	77
3.4.1	Beurteilung von Beschreibungsmitteln für kooperative Rege- lungen und Entscheidungsmechanismen sowie deren Klassifi- kation	77
3.4.2	Auswahl geeigneter Beschreibungsmittel zur Modellierung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs	83
3.5	Fazit zum Stand der Forschung und zur Auswahl der Beschreibungs- mittel	86
4	Verhaltensmodellierung	89
4.1	Modellbildungskonzept auf Basis von Petrinetzen	89
4.2	Grundlagen der Petrinetzbeschreibung	93
4.2.1	Formale Definition, Dynamik und Erreichbarkeit	93
4.2.2	Netztransformationen und Objektnetze	96
4.2.3	Erweiterung auf farbige Netze	100
4.3	Modellierung des Autobahnverkehrs mit Petrinetzen	101
4.3.1	Formationsnetz	103
4.3.2	Straßennetz	113
4.4	Attributrelationen und Verkehrssituationen als Objektsystem	115
4.4.1	Interaktionsrelation und Attribuierung der Modellierungskon- stituenten	118
4.4.2	Modell der Fahrstreifenerweiterung	127
4.4.3	Modell der Fahrstreifenverengung	129
4.4.4	Modell der Abfahrt	129
4.4.5	Modell der Auffahrt	132
4.4.6	Modell der Fortbewegung	134

4.5	Kommunikationsmodellierung	136
5	Regelbasis und Konsensus	143
5.1	Konzept zur Ermittlung einer Regelbasis	143
5.2	Erreichbarkeitsanalyse	147
5.3	Abbildung auf fahrzeuglokales Verhalten und Generierung der Regelbasis	157
5.4	Realisierung der Querdynamik	163
5.5	Integration von Konsens-Algorithmen	163
5.5.1	Grundlagen von Konsens-Algorithmen	164
5.5.2	Realisierung der Längsdynamik	167
6	Implementierung und Simulation exemplarischer Verkehrssituationen	175
6.1	Werkzeug zur petrinetzbasierten Verkehrsmodellierung und für den Entwurf von Entscheidungsmechanismen	176
6.2	Werkzeug zur Simulation kooperativer Fahrzeugagenten	179
6.3	Simulationsergebnisse	181
6.3.1	Simulation einer Fahrstreifenerweiterung	183
6.3.2	Simulation einer Fahrstreifenverengung	184
6.3.3	Simulation einer Formationsbildung unter Kommunikationsrestriktionen	185
6.4	Fazit zur Implementierung und zu den Simulationsuntersuchungen . .	196
7	Zusammenfassung und Ausblick	201
7.1	Zusammenfassung	201
7.2	Ausblick	206
A	Kommunikationsprotokoll zwischen Fahrzeugagenten	213
B	Visualisierung von konsekutiven Verkehrssituationen	215

Abbildungsverzeichnis

1.1	Import und Export Deutschlands [30]	3
1.2	Verkehrsleistung im Modal-Split nach [32, 33]	3
1.3	Unfalltote und die Einführung technischer und gesetzlicher Sicherheitseinrichtungen beim Automobil [34]	6
1.4	Fehlverhalten von Fahrzeugführern bei Unfällen nach [31]	7
1.5	Der Begriff System und dessen Konstituenten sowie der Bezug auf den Verkehr nach [128]	10
1.6	Verkehrsgrößen in mikroskopischer und makroskopischer Sicht [72] . .	11
1.7	Hierarchische Strukturierung von Verkehrskonstituenten nach Schnieder [125]	13
2.1	Die Konstituenten des Verkehrs als Grundlage für den Systementwurf, in Anlehnung an [125, S. 29]	22
2.2	Systemmodell eines Fahrzeugagenten	27
2.3	Wechselseitige Beziehung zwischen Fahrzeugagenten und Cluster mittels einer Assoziationsklasse	30
2.4	Theoretischer Verlauf der mittleren Geschwindigkeit (links) nach [63, S. 141] und des damit verbundenen theoretischen Verkehrsflusses (rechts) in Abhängigkeit der Dichte	35
2.5	Konstituenten technologischer Qualität [153]	53
2.6	Implementierungskonzept Konsensus mit diskreten Entscheidungsmechanismen als Verallgemeinerung von [72]	60
3.1	Einordnung vorliegender Arbeit und verwandter Forschungsprogramme nach Regelungsziel und Regelungsressourcen	66
3.2	Klassifikation von Beschreibungsmitteln für kooperative Regelungsverfahren und Entscheidungsmechanismen	81

4.1	Prinzip der Modellbildung des Autobahnverkehrs mit Petrinetzkomponenten	90
4.2	Konstituenten eines Petrinetzes	93
4.3	Prinzipskizze zur stellenumrandeten Komposition und Dekomposition	97
4.4	Prinzipskizze zu Restriktion und Einbettung	98
4.5	Zuordnung der Petrinetz- zu Verkehrskonstituenten	102
4.6	Struktur eines Formationsnetzes	108
4.7	Vereinfachte Nummerierung der Stellen im Formationsnetz	108
4.8	Repräsentation eines farbigen Formationsnetzes durch zwei Formationsnetze identischer Topologie	113
4.9	Beispielhafte Modellierung des Straßennetzes	116
4.10	Informationsfluss zwischen den Modellierungsebenen und den Komponenten des Straßennetzmodells	119
4.11	Prinzip einer Fahrstreifenerweiterung auf Straßen- und Formationsnetzebene	128
4.12	Prinzip einer Fahrstreifenverengung auf Straßen- und Formationsnetzebene	130
4.13	Prinzip einer Abfahrt auf Formations- und Straßennetzebene	133
4.14	Prinzip einer Auffahrt auf Formations- und Straßennetzebene	135
4.15	Beispiel einer Dichteformation auf Formationsnetzebene	136
5.1	Konzept zur Ermittlung einer Regelbasis [72]	148
5.2	Beispiel zur Referenzformation eines Formationsnetzes mit reduzierter Transitionsmenge	149
5.3	Exemplarischer Erreichbarkeitsgraph für drei Fahrstreifen, vier Aufenthaltsräume in Längsrichtung und acht Fahrzeuge	153
5.4	Formationsnetz zu den exemplarischen Erreichbarkeitsgraphen mit Bezeichnung der Transitionen und den optionalen Kantengewichten im Erreichbarkeitsgraphen	154
5.5	Beispiel eines Graphen für die induzierte Kommunikationstopologie	169
6.1	Programmstruktur der erstellten Skript-Dateien	177
6.2	Exemplarische Visualisierung einer Verkehrssituation in Petrinetznotation auf Straßennetz- und Formationsnetzebene	178
6.3	Simulink-Modell zur kooperativen Regelung eines Fahrzeugclusters . .	180

6.4	Visualisierung des Fahrzeugclusters	181
6.5	Unterlagertes Simulink-Modell eines Fahrzeugs mit integriertem Entscheidungs- und Konsens-Algorithmus	182
6.6	Exemplarischer Verlauf der relativen Längsposition bei einer Fahrstreifenerweiterung	183
6.7	Exemplarischer Verlauf der Querposition bei einer Fahrstreifenerweiterung	184
6.8	Exemplarischer Verlauf der relativen Längsposition bei einer Fahrstreifenverengung ($y=1$) von vier auf drei Fahrstreifen ($t=50$ s) nach einer vorherigen Fahrstreifenerweiterung ($t=15$ s)	185
6.9	Exemplarischer Verlauf der Querpositionen bei einer Fahrstreifenverengung ($y=1$) von vier auf drei Fahrstreifen ($t=50$ s) nach einer vorherigen Fahrstreifenerweiterung ($t=15$ s)	186
6.10	Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten	187
6.11	Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten	187
6.12	Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten	188
6.13	Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten	189
6.14	Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten	190
6.15	Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten	190
6.16	Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 4 Pseudoeinheiten	192
6.17	Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 4 Pseudoeinheiten	192
6.18	Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten	194
6.19	Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten	194

6.20	Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten	195
6.21	Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten	197
6.22	Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten	197
6.23	Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten	198
B.1	Bildung einer Formation maximaler Dichte, alle Fahrzeuge starten auf Fahrstreifen $y=2$, Fahrzeuge 4 und 5 haben bereits Fahrstreifenwechsel durchgeführt.	216
B.2	Bildung einer Formation maximaler Dichte nach einer Fahrstreifen-erweiterung um $y=4$ bei $t = 15s$. Fahrzeug 1 wechselt auf den neu hinzugekommenen Fahrstreifen	216
B.3	Eine Formation maximaler Dichte ist hier noch nicht erreicht. Fahrzeug 3 wird sogleich einen Fahrstreifenwechsel auf den Fahrstreifen $y=1$ vollziehen, um die Formation maximaler Dichte zu erreichen. . .	217
B.4	Formation maximaler Dichte ist erreicht. Es kündigt sich nun eine Reduktion des ersten Fahrstreifens $y=1$ an. Fahrzeuge 3 und 5 werden sich hinter den Fahrzeugen der verbleibenden Fahrstreifen anordnen. .	217
B.5	Fahrzeuge 3 und 5 sind hinter den Fahrzeugen der verbleibenden Fahrstreifen angeordnet. Hiernach werden sie Fahrstreifenwechsel vollziehen, um den wegfallenden Fahrstreifen $y=1$ zu räumen.	218
B.6	Fahrzeug 3 wechselt auf den Fahrstreifen $y=4$, während Fahrzeug 5 auf den Fahrstreifen $y=2$ wechselt.	218
B.7	Nach einem Aufholmanöver auf die Solldistanz zum vorausfahrenden Fahrzeug von Fahrzeug 3 ist die Formation maximaler Dichte bei Reduktion um den Fahrstreifen $y=1$ erreicht. Der stationäre Zustand der Formation ist erreicht.	219

Tabellenverzeichnis

1.1	Regelungsfunktionen und Regelungsressourcen	14
2.1	Abgleich von globalen und agentenlokalen Zielen	31
3.1	Qualitative Beurteilung von Beschreibungsmitteln zur kooperativen Regelung im Straßenverkehr	85
4.1	Visuelle Token-Attribuierung des Straßennetzes	122
5.1	Ermittelte Entscheidungsmechanismen als Wahrheitstabelle	161
6.1	Visualisierung von Attributen in Stellen des Straßennetzes	177
6.2	Visualisierung von Attributen in Transitionen des Straßennetzes und assoziierte Aktionen	178

Das Auto ist jetzt vollkommen. Es bedarf keiner Verbesserung mehr.

Allgemeine Automobil Zeitung,
Berlin 1921

Kapitel 1

Einleitung

Die gesellschaftliche Forderung nach mehr Mobilität erfordert, flankiert durch neue Technologien, die Entwicklung neuer Konzepte zur Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln sowie des Individualverkehrs. Die vorliegende Arbeit widmet sich hierbei dem individuellen Straßenverkehr und zeigt mittels Methoden verteilten Rechnens und der Entwicklung von Kommunikationsprotokollen unter Nutzung von Ad-Hoc-Netzwerken das Potential von verteilten Systemen im Straßenverkehr. Die folgenden Abschnitte zur Einführung in die Thematik sind wie folgt strukturiert: Der sich anschließende Abschnitt gibt eine Einführung in die Nachteile des derzeitigen Straßenverkehrs, worauf in Abschnitt 1.2 die Motivation für den Entwurf eines zukünftigen Straßenverkehrs beruht. Anschließend folgt in Abschnitt 1.3 eine systemische Klassifikation des heutigen Straßenverkehrs, worauf anschließend Organisations- und Abstraktionsebenen des Verkehrs beschrieben werden und hieraus derzeitige Regelungsfunktionen und diesbezügliche Ressourcen identifiziert werden. Nach dieser Einordnung schließt die Einleitung in Abschnitt 1.4 mit der daraus folgenden Zielsetzung und der Formulierung des konzeptionellen Ansatzes.

1.1 Signifikante Nachteile des derzeitigen Straßenverkehrs

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen. Durch dessen Befriedigung ist der Mensch in der Lage, Kontakte zu anderen Menschen zu pflegen sowie Güter zu transportieren. Gerade der Gütertransport hat sich in der Vergangenheit als ein wichtiger Multiplikator und Treiber wirtschaftlichen Handelns erwiesen, was sich einerseits in

der zunehmenden Entwicklung des Im- und Exportvolumens von Deutschland – Abbildung 1.1 – und andererseits in der weiter zunehmenden Güterverkehrsleistung Deutschlands bis 2050 zeigt, wie es die Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung prognostiziert hat:

„Zusammengenommen über alle Hauptverkehrsrelationen ergibt sich bis 2050 eine Zunahme des gesamtmodalen Güterverkehrsaufkommens um beinahe die Hälfte des heutigen Betrages. Von 3.7 Mrd. Tonnen wird sich das Aufkommen um jahresdurchschnittlich 0.9 % auf dann fast 5.5 Mrd. Tonnen erhöhen...“ [78, S. 91]

„...Bis 2030 wird der Strassengüterverkehr mit 1.1 % p.a. zunehmen, danach sind es dann noch 0.5 % p.a, so dass der Lkw im Jahr 2050 noch gut 81 % der gesamtmodalen Nachfragemenge befördern wird...

Zusammenfassend betrachtet fallen die Veränderungen innerhalb des Modal splits beim Güterverkehrsaufkommen nicht sehr groß aus. Mit Umverteilungen in Höhe von 2 Prozentpunkten sind auch bis 2050 keine signifikanten Neuausrichtungen an der heutigen Aufteilung der Transportmenge auf die einzelnen Verkehrsträger zu verzeichnen.“ [78, S. 99-100]

Dieser Modal Split ist in Abbildung 1.2 dargestellt, die zeigt, dass ein Großteil des Güterverkehrs (72 %) durch den Straßenverkehr bedient wird, genau wie auch der Personenverkehr zu 82 % durch den motorisierten Individualverkehr erfolgt. Hieraus erwachsen ökologische Probleme, insbesondere durch den Schadstoff- und Kohlendioxidausstoß von Verbrennungsmotoren, wie auch volkswirtschaftliche Belastungen, die vornehmlich aus Unfällen oder Staus resultieren [11]. Hiernach sind im Jahr 2003 bei Unfällen im Straßenverkehr 6618 Personen ums Leben gekommen, während es beim Eisenbahnverkehr 173 und im Luftverkehr nur 43 Getötete gab. Im Jahr 2010 waren laut Aussage des Statistischen Bundesamts im Eisenbahnverkehr 155 und im Straßenverkehr 3.648 Getötete zu verzeichnen [28, 29]. Der daraus resultierende Anteil von ca. 97% (2003) an Opfern im Straßenverkehr ist im Verhältnis zum Straßenverkehrsanteil des Personenverkehrs überproportional hoch [11]. Dieser Anteil ist im Jahr 2010 mit ca. 96% nur geringfügig gesunken. Die volkswirtschaftlichen Schäden durch Verkehrsunfälle werden in [11] wie folgt angegeben:

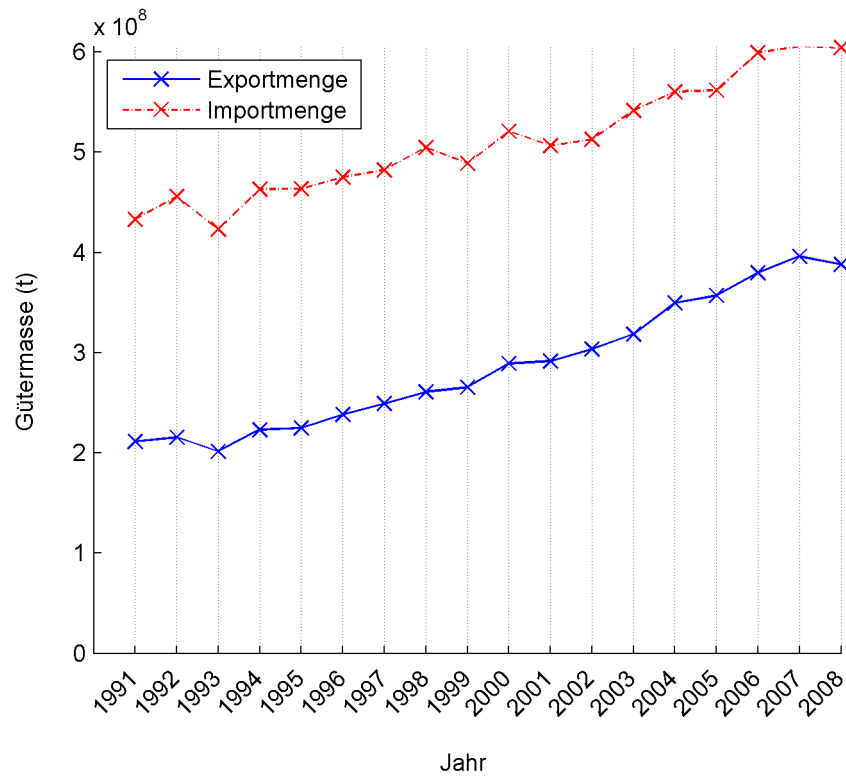


Abbildung 1.1: Import und Export Deutschlands [30]

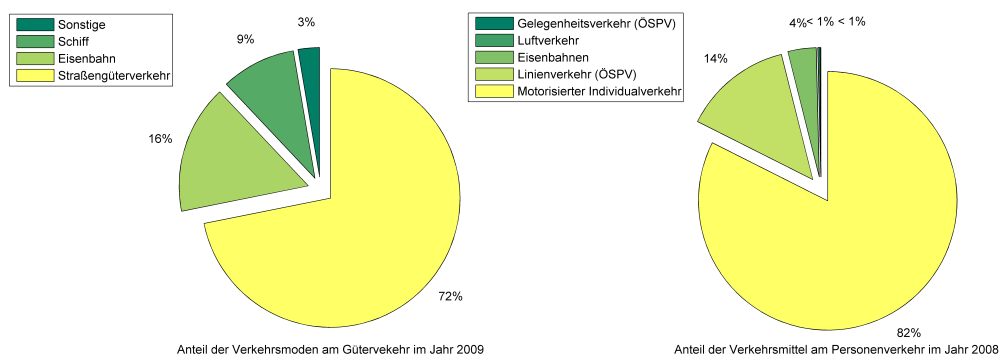


Abbildung 1.2: Verkehrsleistung im Modal-Split nach [32, 33]

- Produktionsausfall der verletzten oder getöteten Personen
- Behandlungs- und Krankenhauskosten
- Materielle Schäden
- Schäden der Opfer und ihrer Angehörigen
- Kosten für Polizei und Rettungsdienste
- Kosten der Gerichtsbarkeit und der Versicherungen

In [11] wird diesbezüglich eine Studie des Instituts für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung der Universität Karlsruhe (IWW) des Jahres 2004 herangezogen, in der die Unfallkosten mit nahezu einem Viertel der Gesamtkosten des Verkehrs ausgewiesen werden. Der überwiegende Anteil der Unfallkosten wird hiernach durch den Straßenverkehr verursacht, an dem der Pkw-Verkehr wiederum zu über 70% beteiligt ist.

Infolge von Staus kommt es ebenfalls zu signifikanten Belastungen. Sie führen zu erhöhten Emissionen, da bei Stop-and-go-Verkehr der Kraftstoffverbrauch und der Schadstoffausstoß im Verhältnis zur zurückgelegten Strecke überproportional ansteigen. Zudem erhöht sich der Zeitaufwand für die zurückgelegte Strecke, was in einem gewissen Maße einen Verlust an Lebenszeit bedeutet. Letzteres ist eine neuere Größe, um neben monetärer Interpretation Auswirkungen von Ereignissen zu quantifizieren. In [11] wird zudem eine Studie des ADAC zitiert, nach welcher der deutschen Volkswirtschaft allein durch Straßenverkehrsstaus jährlich ein Schaden durch Arbeitszeitverluste in Höhe von bis zu 100 Milliarden Euro entstünde. Neben diesem Aspekt werden nach Schätzungen des Deutschen Verkehrsforums, die in [11] zitiert werden, jährlich 20% des Kraftstoffverbrauchs durch Staus verursacht.

Bei gleichzeitiger Betrachtung des zu erwartenden Straßenverkehrsaufkommens, insbesondere in Ländern wie China und Indien, erweisen diese Belastungen und Probleme eine hohe Brisanz und erzeugen die Notwendigkeit, Verkehr neu zu denken; mit dem Ziel eines flüssigen und sicheren Verkehrsablaufs zum Wohle der wirtschaftlichen Entwicklung der Staaten sowie des kulturellen Austauschs.

In den letzten Jahrzehnten war die Betrachtung des Straßenverkehrs hauptsächlich auf das einzelne Fahrzeug fokussiert. Unterschiedliche technische Entwicklungen, welche in Komfortsysteme sowie aktive und passive Sicherheitssysteme unterteilt

werden können, trugen dazu bei, den Fahrkomfort zu erhöhen (wie z. B. bei der automatischen Abstandsregelung ACC) und, was gesellschaftlich relevanter ist, die Anzahl der Unfalltoten, sowie das Ausmaß an Verletzungen im Straßenverkehr zu reduzieren. Hierzu war es hilfreich, dass bei der Einführung dieser Sicherheitseinrichtungen, wie des Sicherheitsgurtes oder des Antiblockiersystems (ABS), diese häufig, wenn auch zeitlich verzögert, durch gesetzliche Rahmenbedingungen oder Selbstverpflichtungen forciert wurden. Dies verdeutlicht die vom Statistischen Bundesamt erzeugte Graphik in Abbildung 1.3. Insbesondere bei der Einführung von Sicherheitsgurten im Automobil lässt sich erkennen, dass eine deutliche Abnahme in der Anzahl der Unfalltoten erst herbeigeführt werden konnte, als das Gesetz zur Gurtpflicht eingeführt wurde. Letzteres kann als Beispiel für die Tatsache dienen, dass der vollständige Nutzen aus technischen Entwicklungen oftmals nur gezogen werden kann, wenn sie von einer sinnvollen Gesetzgebung flankiert werden. Gesetzgebungen können hierbei durch Selbstverpflichtungen der – in diesem Fall der Betrachtung – Automobilindustrie, wie sie z. B. seitens des Verbandes ACEA (Association des Constructeurs Européens d’Automobiles) existieren, redundant werden. Bei der Einführung des ABS wurde z. B. seitens der Mitglieder der ACEA beschlossen, ab dem 01. Juli 2004 alle Fahrzeuge mit weniger als 2,5 t zulässigem Gesamtgewicht serienmäßig mit ABS auszustatten. Gesetzliche Pflicht ist ABS europaweit erst ab der europäischen Fahrzeugklasse M2, die Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 5 Tonnen umfasst [156]¹.

Trotz der beständig sinkenden Unfallanzahl verbleiben Unfälle ein zentrales Problem des derzeitigen Straßenverkehrs. Insbesondere wenn die Unfallursachen betrachtet werden, offenbart sich weiterer Handlungsbedarf und ein entsprechendes Verbesserungspotenzial. Hierbei zeigt sich, dass die meisten Unfälle dem Fehlverhalten von Fahrzeugführern anzulasten sind, was ein Ergebnis eines Forschungsberichts des Bundesamts für Statistik ist:

„Bei den 288 297 Unfällen mit Personenschaden im Jahr 2010 in Deutschland wurden insgesamt 419 190 Unfallursachen statistisch erfasst. Der

¹Siehe hierzu auch die Richtlinie der Europäischen Union 70/156/EWG („Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger: Bremsanlagen bestimmter Kraftfahrzeugklassen (bis 2014)“) und damit verbunden 88/194/EWG zur „Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bremsanlagen bestimmter Klassen von Kraftfahrzeugen und deren Anhängern an den technischen Fortschritt.“

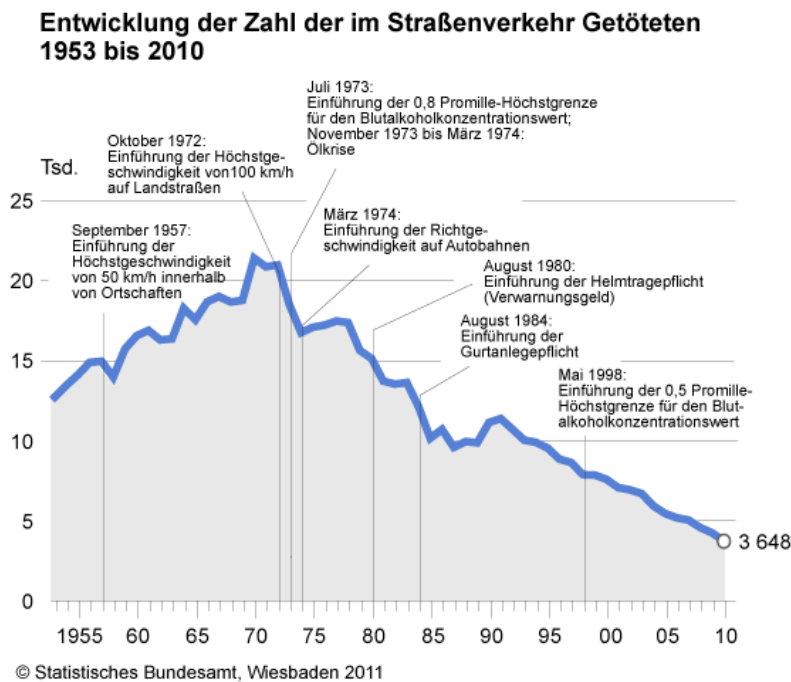


Abbildung 1.3: Unfalltote und die Einführung technischer und gesetzlicher Sicherheitseinrichtungen beim Automobil [34]

größte Teil hiervon (84%) waren Fehlverhalten von Fahrzeugführern, 3,7% waren Fehlverhalten von Fußgängern. Allgemeine Ursachen, zu denen neben der Witterung und den Straßenverhältnissen auch Hindernisse wie zum Beispiel Wild auf der Fahrbahn zählen, hatten einen Anteil von 12% an den erfassten Unfallursachen. Relativ selten wurden technische Mängel beziehungsweise Wartungsmängel als Unfallursache (0,9%) genannt.“[31]

Als Ursache für dieses Verhalten von Fahrzeugführern wurde der Begriff des *devianten Verkehrsverhalten* eingeführt, der das gezielt abweichende Verhalten von geltenden Regeln und Bestimmungen bezeichnet [117]. Das Fehlverhalten von Fahrzeugführern kann des weiteren in Kategorien unterteilt werden, wie sie in Abbildung 1.4 herausgestellt worden sind.

Hier zeigt sich ein großes Potenzial für die Fahrzeugautomatisierung zur Unfallreduktion, wenn davon ausgegangen werden könnte, dass zukünftige Assistenzsysteme oder automatisches Fahren, den Fahrer bei der Geschwindigkeitswahl, des Abstand-

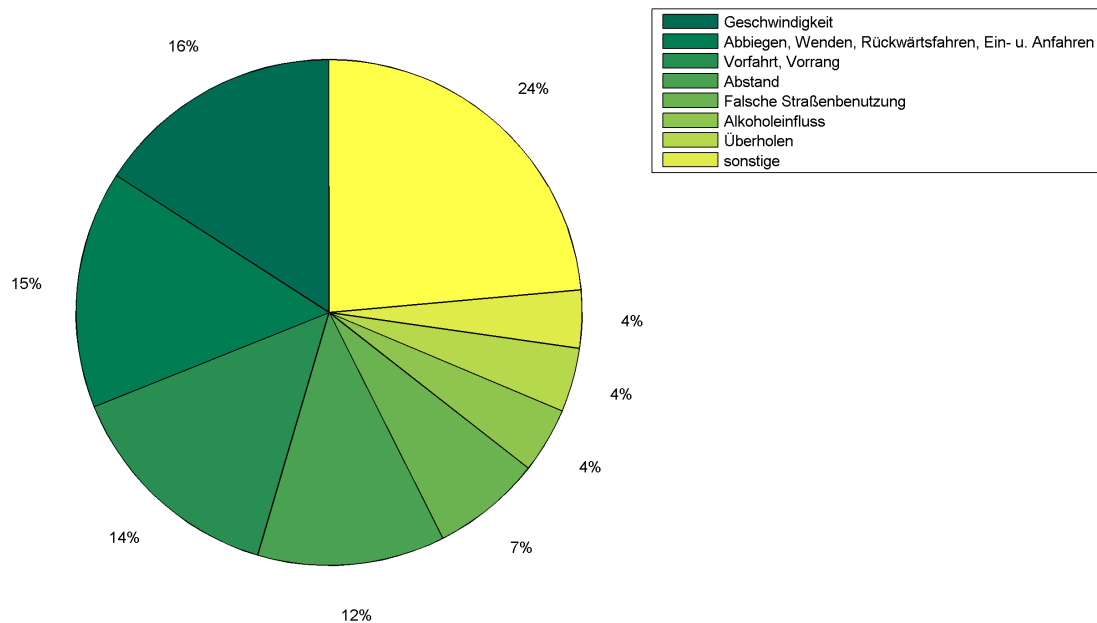


Abbildung 1.4: Fehlverhalten von Fahrzeugführern bei Unfällen nach [31]

verhaltens, der Vorfahrtsbeachtung sowie bei der Straßenbenutzung und bei Überholvorgängen unterstützen bzw. entlasten.

Neben der bisher beschriebenen Phänomene lässt sich als wesentlicher Nachteil des derzeitigen Straßenverkehrs das sog. *heterogene Verkehrsverhalten* herausstellen. Dieser Begriff wurde von Helbing in [63] eingeführt und bezeichnet das sich von Fahrzeug zu Fahrzeug unterscheidende Fahrverhalten, das durch die unterschiedlichen Fahrer verursacht wird. In dem Begriff des heterogenen Verkehrsverhaltens wird folgendes zusammengefasst:

- Varianz bezüglich der gewählten Reisegeschwindigkeit
- Varianz bezüglich des gewählten Abstands
- Varianz im situationsabhängigen Entscheidungsverhalten, d. h. bezüglich
 - der Fahrstreifenwahl
 - der Aufholvorgänge
 - der Verzögerungsvorgänge

Letztlich ist es das heterogene Verkehrsverhalten, das die beschriebenen Phänomene wie zähflüssigen Verkehr, Staus aus dem Nichts und Dichtefluktuationen hervorruft [63]. Des Weiteren spiegeln sich die aufgezählten Charakteristika direkt in den Kategorien des Fehlverhaltens von Fahrzeugführern, sodass ca. 50% der Unfallursachen dem heterogenen Verkehrsverhalten anzulasten sind.

1.2 Motivation für den Entwurf eines zukünftigen Straßenverkehrs

Einem Paradigmenwechsel gleich, verlagert sich aufgrund der Nachteile des derzeitigen Straßenverkehrs jetzt der Fokus von konventionellen Betrachtungen, mit der Ausstattung und den Sicherheitseinrichtungen eines einzelnen Fahrzeugs sowie von infrastrukturseitigen Einrichtungen, auf Interaktionen zwischen Fahrzeugen und damit auf das Verhalten von Fahrzeugkollektiven. Dies soll dazu dienen, die beschriebenen Nachteile des derzeitigen Straßenverkehrs aufzuheben, sei es um Staus und zähflüssigen Verkehr zu verhindern oder Unfälle zu vermeiden. Verfahren aus der Automatisierungs- und Kommunikationstechnik, wie z. B. Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sowie Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation in Kombination mit (teil-) autonom fahrenden Fahrzeugen, können in Zukunft einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, das Verkehrsverhalten über die Beeinflussung von Fahrzeugkollektiven zu verbessern. So könnten die Positionen und Geschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen ausgehandelt werden, um einen gewünschten, optimalen Verkehrsablauf zu generieren. Dadurch würde sich global ein höherer Durchsatz im Straßenverkehr ergeben, bei im Vergleich in Summe reduzierter Unfallanzahl und vermindertem Kraftstoffverbrauch.

Denkbar ist ebenfalls, dass durch die Ausnutzung dieser Technologien die Rolle des Fahrzeugführers überflüssig würde. In letzter Konsequenz, bei einer Vollautomation der Fahrzeuge, werden nur noch Passagiere in den Fahrzeugen fortbewegt, die im Vertrauen auf ein optimiertes Verkehrsgeschehen beliebigen Beschäftigungen nachgehen könnten. So könnte z. B. bei Geschäftsreisenden der durch Fahrten langer Reisedauer verursachte Produktivitätsverlust dadurch gemildert werden, dass während der Fahrt gearbeitet werden kann, anstatt die häufig ermüdende und somit belastende Fahraufgabe wahrzunehmen. Jedoch auch Freizeitbeschäftigungen sind aus der Sicht des Fahrzeugführers während der Fahrt dann besser möglich, was zu

einem großen Komfortgewinn gegenüber jenen Assistenzsystemen beitragen würde, bei denen der Fahrer immer noch gezwungen ist, die Fahraufgabe zu überwachen.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zu einem flüssigeren und sicheren Verkehrsablauf leisten und beschäftigt sich insbesondere mit der Fragestellung, wie dies mit Verfahren der Automatisierungs- und Kommunikationstechnik realisiert werden kann.

1.3 Systemische Einordnung des Straßenverkehrs

Um den Straßenverkehr im obigen Sinne gezielt beeinflussen zu können, bedarf es zunächst einer Identifikation der Eigenschaften des Systems „Verkehr“. Wie in Abbildung 1.5 dargestellt, lässt sich ein System grundsätzlich in seine Eigenschaften „Zustand“, „Struktur“, „Verhalten“ und „Funktion“ zergliedern (vgl. [72] und [125]). Diese wirken in der Art zusammen, dass sich die beobachtbaren Charakteristika des betrachteten Systems ergeben. Zentraler Angriffspunkt für eine Beeinflussung eines Systems ist dessen Struktur. Die Struktur umfasst durch die Abgrenzung des Systems gegenüber seiner Umwelt alle Komponenten, die das beobachtete Verhalten erzeugen. Innerhalb dieses Systemverhaltens können bestimmte stationäre und quasistationäre Zustände existieren, je nachdem, welche Eingangsgrößen auf das System wirken. Zusätzlich wird dem Systemverhalten und den dort verorteten Zuständen eine Funktion zugeordnet, unter deren Aspekt das Verhalten und die Zustände beeinflusst werden können. Die Identifikation der Systemstruktur, d.h. die Systemabgrenzung und die Definition von Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen, sowie deren Abbildung, sind zentrale Aufgaben der Modellbildung. Letztere soll in der Regel so erfolgen, dass das beobachtete Verhalten des realen Systems und seine Zustände – für den jeweiligen Anwendungsfall hinreichend – dem des Modells entsprechen. Dies kann nur der Fall sein, wenn die Systemstruktur hinreichend genau abgebildet wurde, wofür ein geeignetes Beschreibungsmittel zu wählen ist.

Betrachtet man die Struktur des Systems Straßenverkehr, lässt sich feststellen, dass es sich um eine Vielzahl an Fahrer-Fahrzeug-Einheiten handelt, die gemeinsam die gegebene begrenzte Infrastruktur nutzen. Diese Fahrer-Fahrzeug-Einheiten unterscheiden sich zum Teil stark in ihrem Fahrverhalten, sind jedoch in der Lage untereinander derzeit vornehmlich visuell, d.h. begrenzt, zu kommunizieren, wie z.B. durch Blinker, Lichthupe etc.

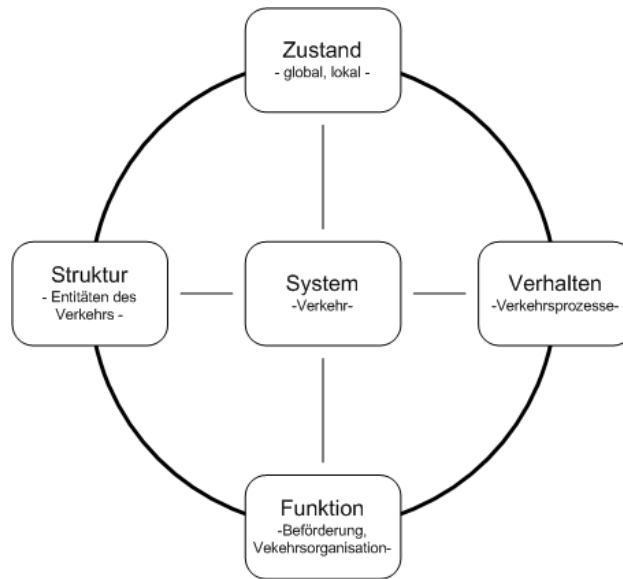


Abbildung 1.5: Der Begriff System und dessen Konstituenten sowie der Bezug auf den Verkehr nach [128]

Die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten verfolgen im Prinzip ein gemeinsames Ziel: möglichst sicher, in kürzester Zeit an den individuellen Zielort zu gelangen. Derzeit werden diese Kriterien – Sicherheit und Geschwindigkeit bzw. Reisezeit – häufig seitens der Fahrer/innen als einander widersprechend angesehen, was zu einem großen Teil auch darauf zurückzuführen ist, dass eine gewisse persönliche Priorisierung hin zu eher progressivem oder eher defensivem Fahren verleitet, was ebenfalls als Aspekt des heterogenen Verkehrsverhaltens bezeichnet werden kann. Eine Beeinflussung dieses ungewünschten Verhaltens kann aufgrund der Modellstruktur nur auf das jeweilige lokale Verhalten der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten abzielen. Hierzu kann zum einen die Fahrerausbildung gezählt werden, wo den Fahrschülern/schülerinnen ein bestimmter Satz an Regeln wie Geboten und Verboten vermittelt wird. Zum anderen wird im derzeitigen Verkehrsgeschehen das Fahrerverhalten mittels Wechselzeichenanlagen, Lichtzeichenanlagen und statischen Verkehrszeichen beeinflusst. Letzteres lässt sich im systemischen Kontext als Beeinflussung des Entscheidungsverhaltens mittels Kommunikation identifizieren, egal ob optisch oder akustisch. Kommunikation dient neben ihrem informativen Aspekt insbesondere dazu, die Interaktionen zwischen den Fahrer-Fahrzeug-Einheiten zu koordinieren. Aus diesen koordinierten Interaktionen, welche das Systemverhalten repräsentieren, entstehen gewisse Zustände, die zum einen lokal – aus der Sicht einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit, d. h. mikroskopisch – und

zum anderen global, d. h. makroskopisch – aus Sicht eines Gesamtverkehrsverhaltens – interpretiert werden können. Die jeweiligen Zustandsgrößen dieser Detaillierungsebenen werden in Abbildung 1.6 anhand einer Autobahn symbolisch dargestellt [72]. Hier wird deutlich, dass das Zusammenwirken mikroskopischer Verkehrsgrößen, wie

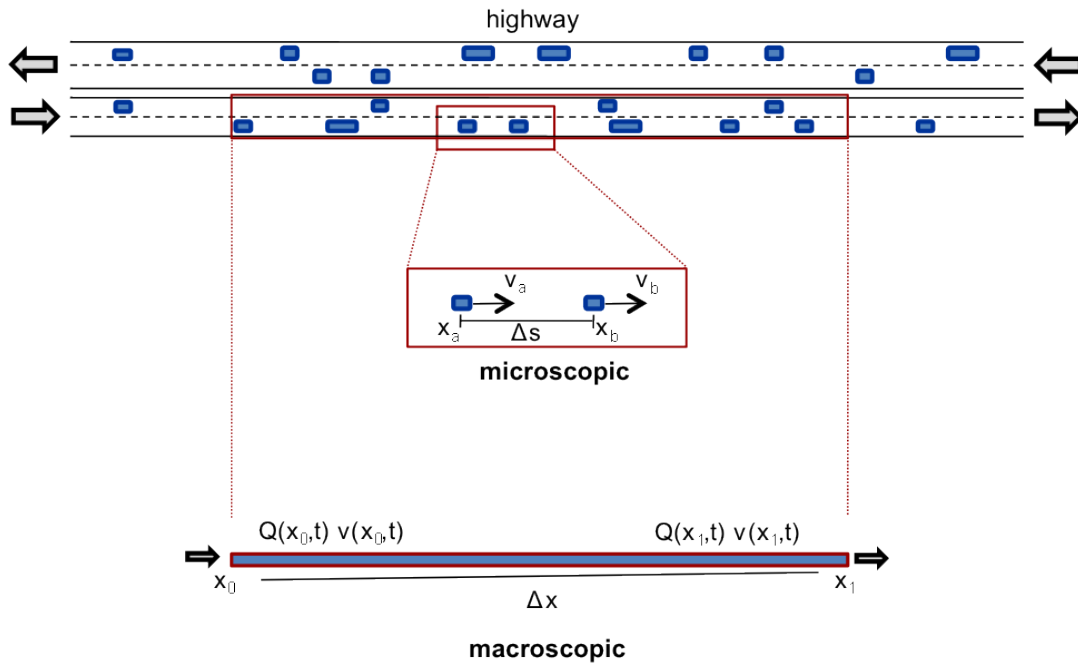


Abbildung 1.6: Verkehrsgrößen in mikroskopischer und makroskopischer Sicht [72]

des Abstands zum voraus fahrenden Fahrzeug und der Ego-Geschwindigkeit, in einem Kollektiv ein gewisses makroskopisches Verhalten induziert, das durch entsprechende makroskopische Verkehrsgrößen wie z.B. Dichte und Verkehrsfluss ausgedrückt werden kann.

Neben der Beschreibung eines Systems anhand der Konstituenten „Zustand“, „Struktur“, „Funktion“ und „Verhalten“ lassen sich dessen Funktionen bestimmten Hierarchiestufen zuweisen, wie es in [124] dargelegt ist. Hierbei ist es unwichtig, um welches System es sich im konkreten Fall handelt; stets lassen sich die jeweiligen Funktionen eines Systems der strategischen, der dispositiven, der taktischen und der operativen Organisationsebene zuordnen. Der Bezug dieser Ebenen zu Elementen von Verkehrssystemen ist in [125] angegeben. Die dort zugrunde gelegte Struktur zeigt Abbildung 1.7. Hier werden die funktionalen Ebenen eines Systems genutzt, um die organisatorische Hierarchie von Funktionen im Verkehr sowie orthogonal dazu das Abstraktionsniveau von Verkehrselementen zu beschreiben, wie

Flüsse die in Flotten dekomponiert und diese wiederum in einzelne Fahrzeuge unterteilt werden können. Die Verkehrselemente der Abstraktion und die Organisationsfunktionen können des Weiteren den Konstituenten von Verkehrsprozessen – Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel und Verkehrsobjekte – zugeordnet werden. Je höher die Abstraktionsebene oder die organisatorische Ebene, desto stärker wird die Zugehörigkeit zu diesen Konstituenten eingegrenzt. Es ergibt sich eine natürliche Eingrenzung auf Verkehrsmoden bei Betrachtung der Abstraktionsordinate sowie bei der organisatorischen Ordinate auf die dazugehörigen Modal-Split-Verfahren.

Diese organisatorischen Elemente können als Regelungsfunktionen von unterschiedlicher Granularität interpretiert werden, während auf der Abstraktionsskalisierung die dazugehörigen unterschiedlich granularen Regelungsressourcen zu finden sind. In Bezug auf die Automatisierungstechnik lässt sich die Granularität als lokale oder globale Realisierung von Funktionen und zugehörigen zentralisierten oder verteilten Ressourcen auffassen. Diese Zuordnung ist in Tabelle 1.1 aufgezeigt. Hiermit lassen sich Automatisierungssysteme hinsichtlich ihrer Funktionen und Ressourcennutzung und bezüglich der zugehörigen Granularität klassifizieren. Neben Beispielen aus dem Straßenverkehr sind hier auch Systeme des Schienenverkehrs eingeordnet worden. So ist beispielsweise bei der Steuerung eines Bahnübergangs die Regelungsfunktion örtlich lokal realisiert, wogegen die Ressourcen der Steuerung, d.h. die Rechnersysteme, welche die Steuerung des Bahnübergangs vornehmen, örtlich verteilt vorkommen. Dies ist bei Betrachtung eines Fahrzeugs, unabhängig vom Verkehrsmodus, genauso. Bei einer Fahrzeugregelung, beispielsweise der Längs- und Querdynamik, handelt es sich um eine lokal (im Fahrzeug) realisierte Funktionalität, während die Ressourcen (Sensorik, Aktorik, insb. die Rechnersysteme etc.) im Fahrzeug örtlich verteilt sind. Anders verhält es sich z. B. bei einer Kreuzungssteuerung. Dort sind die Funktionen zur Realisierung dieser Regelungsaufgabe lokal implementiert, während die genutzten Ressourcen ebenfalls nur zentral zur Verfügung stehen (wie z. B. der zugehörige Rechner). Globale Regelungsfunktionen werden hingegen beispielsweise bei der Verkehrsführung realisiert, was sich in den Zielen der Stauvermeidung und der Verbesserung des Verkehrsflusses äußert. Diese Ziele werden jedoch seitens zentraler Einrichtungen, wie einer Verkehrsleitzentrale mit entsprechender Rechnerausstattung, verfolgt.

Eine Regelung im Straßenverkehr, bei der globale Regelungsfunktionen unter Nutzung verteilter Ressourcen realisiert werden, existiert bislang nicht. Letzteres ent-

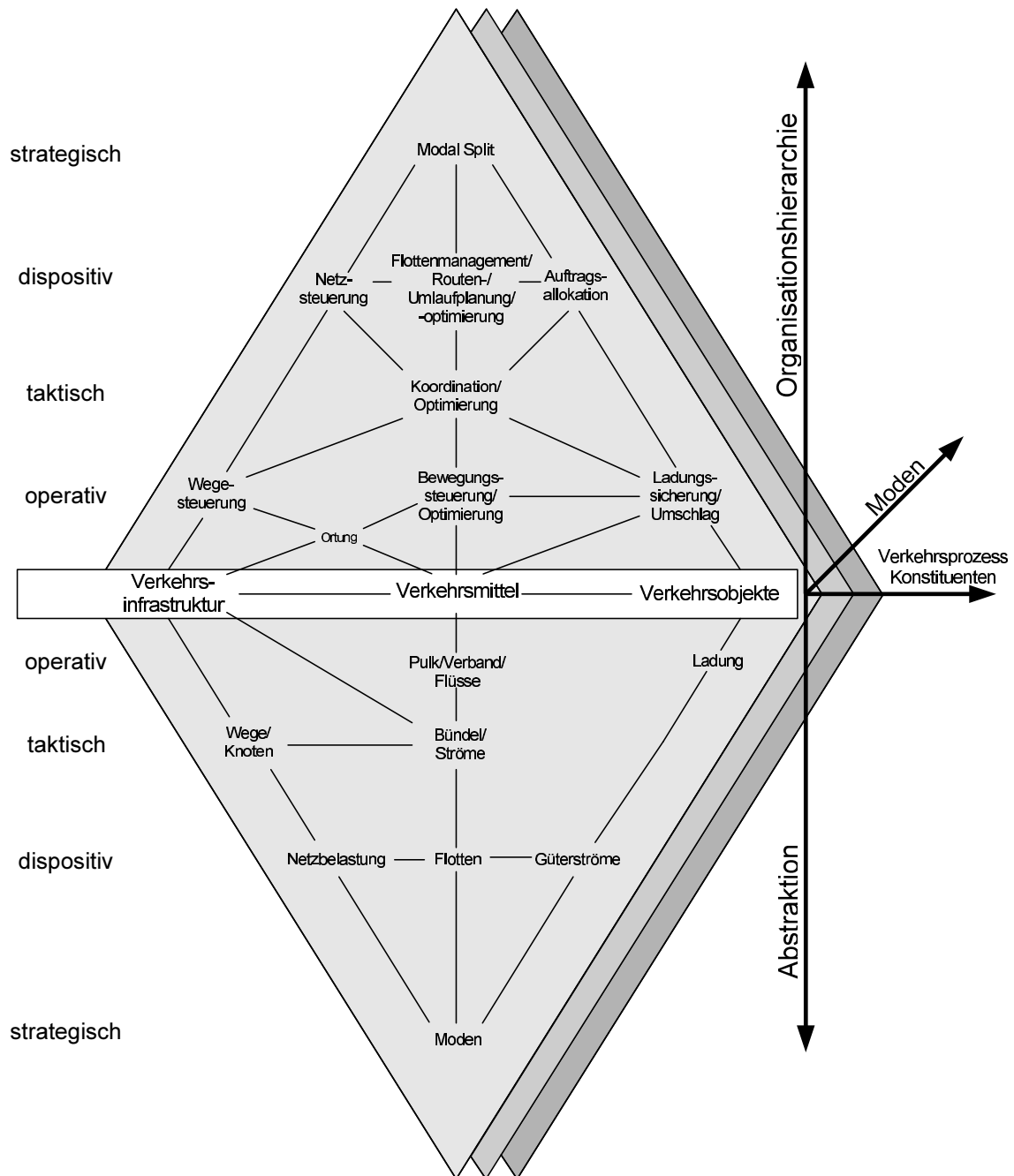


Abbildung 1.7: Hierarchische Strukturierung von Verkehrskonstituenten nach Schnieder [125]

spricht einem verteilten System, bei dem ein globales, über einzelne Instanzen hinausragendes Problem mittels eines verteilten Algorithmus auf mehreren Instanzen gelöst wird. Solch ein verteiltes System existiert z. B. bei einer Formationsregelung von Drohnen. Eine dortige Zielformation repräsentiert eine globale Regelungsfunktion, während die Ressourcen, welche diese realisieren, die Drohnen selbst darstellen, sofern keine übergeordnete Instanz in Form eines Zentralrechners die Positionen der Drohnen kontrolliert und korrigiert, sondern die Drohnen sich autonom fortbewegen und untereinander kommunizieren.

Tabelle 1.1: Regelungsfunktionen und Regelungsressourcen

		Regelungsfunktion	
		lokal	global
Regelungsressourcen	verteilt	Fahrzeugregelung Fahrzeugnavigation Bahnübergangsstrg.	Drohnen-Formationsregelung
	zentral	Weichenregelung Kreuzungssteuerung Zugsteuerung	Flottenverteilung Flussregelung Verkehrsführung

Im derzeitigen Straßenverkehr werden globale Regelungsziele, wie die Verbesserung des Verkehrsflusses und Stauvermeidung, durch Verkehrsleitzentralen verfolgt, die den Fahrzeugen Handlungsempfehlungen, wie z. B. in Form von angepassten Höchstgeschwindigkeiten, via Wechselverkehrszeichen geben. Hierzu werden mittels Infrastruktureinrichtungen wie Induktionsschleifen makroskopische Verkehrsdaten von der Leitzentrale ermittelt und ausgewertet. Mittels einer vollständig dezentralen Realisierung könnte weitestgehend auf solch infrastrukturseitige Einrichtungen verzichtet oder deren Daten ergänzend genutzt werden. Aus Informationen des Kollektivs von Fahrzeugen können diese in die Lage versetzt werden, kooperativ Handlungsentscheidungen zu treffen, die der jeweiligen Verkehrssituation angepasst sind und somit das Gesamtverkehrsverhalten verbessern.

1.4 Zielsetzung und methodischer Ansatz

Das grundsätzliche Ziel, das im Rahmen dieser Arbeit verfolgt wird, ist durch einen geeigneten Systementwurf die beschriebenen Nachteile des derzeitigen Straßenverkehrs aufzuheben. Dies bedeutet in erster Linie, eine Homogenisierung des Verkehrsverhaltens herbeizuführen. Gleichzeitig sollen Kollisionen zwischen Fahrzeugen verhindert werden, um Personen- und Sachschäden zu vermeiden. Und im Rahmen des zu entwickelnden Konzepts soll es ermöglicht werden, den Verkehrsfluss, das heißt die Dichte sowie die mittlere Geschwindigkeit, im Straßenverkehr zu erhöhen.

Es existieren Projekte, in denen ebenfalls die Ziele der Stauvermeidung und der Verkehrsflusserhöhung verfolgt werden, wie z.B. AKTIV [14] oder simTD [154]. Die dortigen Lösungsansätze basieren auf einer Auswertung von Verkehrsmessgrößen seitens einer Leitzentrale, die anschließend über Road-Side-Units (RSUs) mittels Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation Handlungsempfehlungen an die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten schickt. Hier besteht das Problem, dass das Verkehrsverhalten nicht vorhersehbar ist, wenn sich einzelne Fahrer/-innen nicht an die Handlungsempfehlungen halten. Solch ein dem globalen Ziel eines flüssigen Verkehrs widersprechendes Verhalten kann insbesondere dann hervorgerufen werden, wenn den Fahrern/-innen die Auswirkungen ihrer Entscheidungen nicht direkt bewusst gemacht werden können. Dies liegt insbesondere daran, dass die Auswirkungen häufig räumlich und zeitlich nicht nahe genug am Ort und Zeitpunkt der getroffenen Entscheidung auftreten, z. B. erst einige Kilometer hinter dem betreffenden Fahrzeug, das eine Handlung ausgeführt hat. Im Umkehrschluss können von einer Leitzentrale gesendete Handlungsempfehlungen den Fahrern/-innen akausal und daher nicht sinnvoll erscheinen. Selbst wenn nur einige der Fahrer/-innen sich entgegen den Handlungsempfehlungen entscheiden, verbleibt ein nicht prädictierbares und im Sinne der Verkehrsregelung suboptimales Verkehrsverhalten.

Wenn nun davon ausgegangen werden kann, dass eine nicht zu vernachlässigende Anzahl an Fahrern/-innen in dieser Form subjektiv geprägte und oft unfallverursachende Entscheidungen fällen und diesbezügliche Handlungen ausführen, stellt sich die Frage, welcher Art die seitens der RSUs distribuierten Informationen sein dürfen. Die FahrerIn bzw. der Fahrer trifft im Autobahnverkehr Entscheidungen aufgrund der lokal erfassbaren Informationen, wie Abstand und geschätzter Relativgeschwindigkeit oder Verteilung der Fahrzeugabstände auf den Fahrstreifen. Die Entschei-

dungen der Längspositionsanpassung, Geschwindigkeitswahl und Fahrstreifenwahl sind also operativer Natur, da sie nur aufgrund von Informationen eines örtlich und zeitlich begrenzten Umfelds getroffen werden, und zwar wegen der persönlichen Sichtweite bzw. des unmittelbaren Erfahrungshorizonts (vgl. Abbildung 1.7). Sie beeinflusst zwar auf Abstraktionsebene ein örtlich begrenztes Kollektiv von Fahrzeugen, jedoch ist ein definiertes Verhalten des Kollektivs nicht Teil des Regelungs- oder Steuerungsziels der Fahrerin oder des Fahrers, sondern nur das fahrzeuglokale Verhalten. Operative Entscheidungen (in Form von Handlungsempfehlungen) können unter dem genannten Aspekt der menschlichen Handlungsverweigerung daher nicht sinnvoll seitens eines solchen Leitsystems vorgegeben werden. Es verbleiben daher die taktische und die dispositive Entscheidungsebene, die für eine zentrale leitsystemseitige Informationsdistribution als geeignet erscheinen, sofern angenommen wird, dass strategische Entscheidungen über die Verkehrsmittelwahl bzw. die genutzten Verkehrsmoden dem Fahrer obliegen. Nach dem Ebenenmodell des Verkehrs (siehe Abbildung 1.7) betreffen die taktischen Handlungen definierte Gruppen von Fahrzeugen, während die dispositiven Handlungen nach dem Dekompositionsprinzip aus Gruppen gebildete Flotten betreffen, d. h. im übergeordneten Sinne Fahrzeugströme. Aufgrund der Fusion der fahrzeuglokalen Daten seitens einer Verkehrsleitzentrale können nur dispositive Entscheidungshilfen an die Fahrer kommuniziert werden, wie zum Beispiel die Empfehlung einer Umleitung oder Warnungen vor stattgefundenen Unfällen auf der Strecke. Dies betrifft letztlich auch den Aspekt der Verkehrssicherheit. Es können nur Warnungen vor Staus, Spurverengungen oder Unfällen kommuniziert werden. Fahrzeuglokale Handlungsentscheidungen, die helfen können Unfälle und kritische Situationen, wie z. B. bei Auffahrten oder Spurverengungen, fahrzeuglokal zu vermeiden und darüber hinaus optimale Zustände wie Abstände oder Geschwindigkeiten zu halten, können nicht gegeben werden. Ein besonderer Eindruck dieses Sachverhaltes lässt sich gewinnen, wenn die Verteilung der RSUs entlang der Fahrtstrecken betrachtet wird. Hier stellt sich die grundsätzliche Frage, in welchen Abständen, die auch äquidistant sein können, RSUs verteilt werden müssen, um den Geschwindigkeitsverlauf eines Fahrzeugs über der Fahrtstrecke korrekt aus dieser ortsdiskreten Abtastung zu rekonstruieren. Nimmt man einen cosinusförmigen Geschwindigkeitsverlauf eines Fahrzeugs über der Zeit mit einer definierten Frequenz f und einer mittleren Geschwindigkeit v_0 an, dann lässt sich der Verlauf der Geschwindigkeit v über der Fahrtstrecke s mit $v(s) = v_0 \cdot \cos(\arcsin(\frac{2\pi f}{v_0} \cdot s))$

angeben. Es ist zu erkennen, dass die Ortsfrequenz nicht konstant ist, trotz gegebener konstanter Frequenz f des Signals der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit. Aus bekannten Geschwindigkeitsverläufen der Fahrzeuge müsste also die maximale Ortsfrequenz des Geschwindigkeit-Weg-Verlaufs ermittelt werden. Nach dem Abtasttheorem nach Shannon und Nyquist ist es notwendig, das vorliegende Signal mindestens mit doppelt so hoher Frequenz abzutasten. Aus der Praxis der Signalverarbeitung ist bekannt, dass gute Ergebnisse erst mit zehnfacher Abtastfrequenz erreicht werden. Bei einer maximalen Ortsfrequenz des Geschwindigkeitssignals über der Strecke von $1/(500\text{m})$ ergäbe sich hiernach eine praktisch notwendige Installation von RSUs in einer Distanz von 50 m. In [24] konnte gezeigt werden, dass die derzeitige Distanz von mehr als 500 m [23, S. 105] zwischen Induktionsschleifen oder Brücken zur Geschwindigkeitserfassung nicht ausreichend ist, den Geschwindigkeitsverlauf der Fahrzeuge zu rekonstruieren. Die hier skizzierte Methode zur problemadäquaten Installation von ortsfesten Mess- oder Referenzpunkten findet sich auch in [153].

Aus dieser Betrachtungsweise wird deutlich, dass sich eine Beeinflussung der fahrzeugseitigen Handlungen auf taktischer und operativer Ebene mit dem Zweck der Verbesserung des gesamten Verkehrsgeschehens im Hinblick auf eine Homogenisierung so nicht realisieren lässt. Der in dieser Arbeit formulierte Lösungsansatz, der dies ermöglichen soll, basiert auf der Interpretation des Straßenverkehrs als Multi-Agenten-System (MAS), bestehend aus sich autonom fortbewegenden, untereinander kommunizierenden Fahrzeugen, die als Agenten repräsentiert werden, sog. *Fahrzeugagenten*. Diesen können bestimmte Funktionen zugeordnet werden, die obige Ziele unter Nutzung entsprechender technischer Ressourcen realisieren. Zu diesen Funktionen gehört auch diejenige, die das Handeln eines Fahrzeugagenten, d. h. die dort integrierten Entscheidungs- und Regelungsmechanismen, bestimmt. Unter der Zielsetzung, eine Homogenisierung des Straßenverkehrs herbeizuführen, wird eine Methode für die Auslegung dieser Entscheidungs- und Regelungsmechanismen entworfen. Hierbei wird allein der Straßenverkehr auf Autobahnen betrachtet. Stadtverkehr soll unberücksichtigt bleiben. Für einen Ausschluss oben genannter Problemstellungen, die den Fahrzeugführer betreffen, wird von vollautomatischen Fahrzeugen im zukünftigen zu entwerfenden Autobahnverkehr ausgegangen.

Die Umgebungstopologie des Autobahnverkehrs stellt bei dieser Betrachtung die nutzbaren Ressourcen der Fahrzeugagenten zur Verfügung; gleichzeitig definiert sie

Nebenbedingungen, welche die Handlungen der Fahrzeugagenten einschränken. Bei gegebenen, jedoch beschränkten Ressourcen leiten sich hieraus die Fragestellungen der räumlichen (Ziel-) Anordnung der Fahrzeugagenten, der Reihenfolge und der Anzahl der durchzuführenden Interaktionen ab. Eine wichtige Forderung ist zudem, dass während der Interaktionen die Anordnungen selbst stabil bleiben und diese keine unerwünschten Transienten erzeugen, welche die Nebenbedingungen verletzen, sondern optimale Übergänge vollziehen und optimale, stabile Globalzustände erreichen. Des Weiteren ist die Einwirkung inhärenter Eigenschaften eines Kommunikationsnetzwerks zu berücksichtigen, über das die Agenten untereinander Informationsvariable austauschen.

Die Entwurfsmethode der Entscheidungsmechanismen fußt auf der Idee, dass die Umgebungsbedingungen des Autobahnverkehrs direkt den Raum aller möglichen Handlungen der Fahrzeugagenten definieren. Das gewünschte globale Verhalten ist daher eine Untermenge dieser Handlungen, die gewissen definierten Maßen genügt. Letztere ergeben sich aus der Anordnung und den lokalen Variablen der Fahrzeugagenten. Durch lokale Entscheidungsmechanismen in jedem Fahrzeugagenten soll genau diese Menge an Handlungen erreicht werden, sodass aus der Identifikation der jeweils notwendigen Menge an Handlungen in einer Verkehrssituation auf das fahrzeuglokale Entscheidungsverhalten rückgeschlossen werden kann. Eine zusätzliche kooperative Regelung auf Basis von Konsens-Algorithmen soll darüber hinaus dafür sorgen, dass die Fahrzeuge auch unter Effekten des Kommunikationsnetzwerks stabile Relativpositionen beibehalten und kein unerwünschtes transientes Verhalten erzeugt wird.

1.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ergibt sich aus der Zielsetzung und dem skizzierten Ansatz aus Abschnitt 1.4. Bislang wurden in Kapitel 1 die grundsätzliche Problemstellungen des Straßenverkehrs benannt und eine Motivation für den Entwurf eines zukünftigen Straßenverkehrs gegeben. Die daraus und aus einer systemischen Einordnung des Verkehrs abgeleitete Zielsetzung liegt in einem homogenisierten Straßenverkehr, der mit einem Multiagentensystem bestehend aus autonomen Fahrzeugagenten realisiert werden soll.

Dieser konzeptionelle Ansatz wird in Kapitel 2 genauer ausgeführt und die Ei-

enschaften eines Fahrzeugagenten definiert. Dabei wird die Herleitung der Regelungsfunktionen und Entscheidungsmechanismen für die Handlungen eines Fahrzeugagenten als offene Problemstellung benannt, die in der vorliegenden Arbeit weiter behandelt wird.

Daher werden diesbezügliche Lösungsansätze im Stand der Forschung von Kapitel 3 nach einer Einordnung des konzeptionellen Ansatzes in die Forschungslandschaft thematisiert und anschließend klassifiziert. Aufgrund dieser Klassifikation und des Konzepts von Fahrzeugagenten lassen sich Kriterien formulieren, die der Auswahl von Beschreibungsmitteln dienen, welche eine Ermittlung von Regelungsfunktionen eines Fahrzeugagenten in Form einer Formationsregelung und von diskreten Entscheidungsmechanismen ermöglichen.

In Kapitel 4 werden diese Beschreibungsmittel – Petrinetze und Kommunikationsgraphen sowie mit diesen verknüpft Konsens-Algorithmen – für den vorliegenden Anwendungsfall des Straßenverkehrs auf Autobahnen konzipiert und attribuiert sowie exemplarische Verkehrssituationen modelliert. Diese Beschreibungsmittel werden in Kapitel 5 genutzt, um Methoden zur Entwicklung einer Regelbasis und deren Kombination mit Konsensalgorithmen zu formulieren.

Kapitel 6 beschreibt als Werkzeug ein Rahmenwerk, das genutzt wurde, um eine exemplarische Regelbasis herzuleiten sowie für Simulationszwecke des resultierenden Verhaltens einzelne Fahrzeugagentenmodelle und ein Modell eines Kommunikationsnetzwerks zu implementieren. Die entworfene Regelbasis mit dem Protokoll eines Konsens-Algorithmus wird in den einzelnen Fahrzeugagenten implementiert, sodass Simulationen des resultierenden Verkehrsverhaltens durchgeführt und exemplarische Simulationsergebnisse dargestellt werden können.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der beschriebenen Inhalte und gibt danach einen Ausblick auf weiterführende Arbeiten auf dem Gebiet der Automatisierung des Straßenverkehrs.

Wenn ich die Menschen gefragt
hätte, was sie wollen, hätten sie
gesagt: schnellere Pferde.

Henry Ford

Kapitel 2

Methodischer Entwurf eines kooperativen Straßenverkehrs

Unter der Zielsetzung einer Homogenisierung des Straßenverkehrs soll in diesem Kapitel die Konzeption eines zukünftigen kooperativen Straßenverkehrs dargestellt werden. In dem sich anschließenden Abschnitt wird hierzu das System des Straßenverkehrs und seine Konstituenten betrachtet und untersucht, an welcher Stelle Eingriffsmöglichkeiten für eine Homogenisierung vorliegen. Anschließend wird der Fokus auf die Fahrzeugsteuerung gelegt und der Begriff des Fahrzeugagenten eingeführt. Das Konzept von Fahrzeugagenten wird im darauf folgenden Abschnitt erläutert, indem festgelegt wird, über welche Eigenschaften und Merkmale dieser verfügen muss, um die globalen Regelungsziele verfolgen und erreichen zu können. Hier wird ebenfalls eine Zuordnung zu technischen Ressourcen vorgenommen, mit denen die Umsetzung der Funktionen eines Fahrzeugagenten möglich erscheint. Das Kapitel stellt somit die Grundlage für die Auswahl von Beschreibungsmitteln dar, die in dem darauf folgenden Stand der Forschung in Kapitel 3 vorgenommen wird, und schließt mit einer kurzen Zusammenfassung.

2.1 Konzeptentwurf anhand der Konstituenten des Verkehrs

Um das Verkehrsgeschehen insgesamt zu beeinflussen, ist es notwendig, die Zusammenhänge der einzelnen Elemente des Verkehrs zu untersuchen. Gemäß [125, S. 29] sind die Begriffe *Verkehrsobjekt*, *Verkehrsmittel*, *Verkehrswegeinfrastruktur* und

Verkehrsorganisation Konstituenten des Verkehrs. Eine vereinfachte, auf die vorliegende Problemstellung angepasste Visualisierung der Zusammenhänge zwischen diesen Konstituenten ist in Abbildung 2.2 als UML-Klassendiagramm angegeben. Die Assoziationen bezeichnen hierbei die jeweiligen Zusammenhänge zwischen den Konstituenten. So werden Verkehrsobjekte, wie Personen oder Güter, seitens der Verkehrsmittel als Ladungsträger transportiert. Die Verkehrsmittel als Verkehrsteilnehmer wiederum nutzen eine bestimmte Infrastruktur, wie in diesem Falle die Fahrbahnen des Autobahnnetzes. Die Verkehrsorganisation umfasst die prozeduralen Abläufe im Verkehr und die jeweiligen Gesetze, Richtlinien und Verordnungen. Sie kann in Teilen innerhalb der Klassen Verkehrsmittel, Verkehrsobjekt oder Verkehrsweeinfrastuktur implementiert sein [125, S. 28].

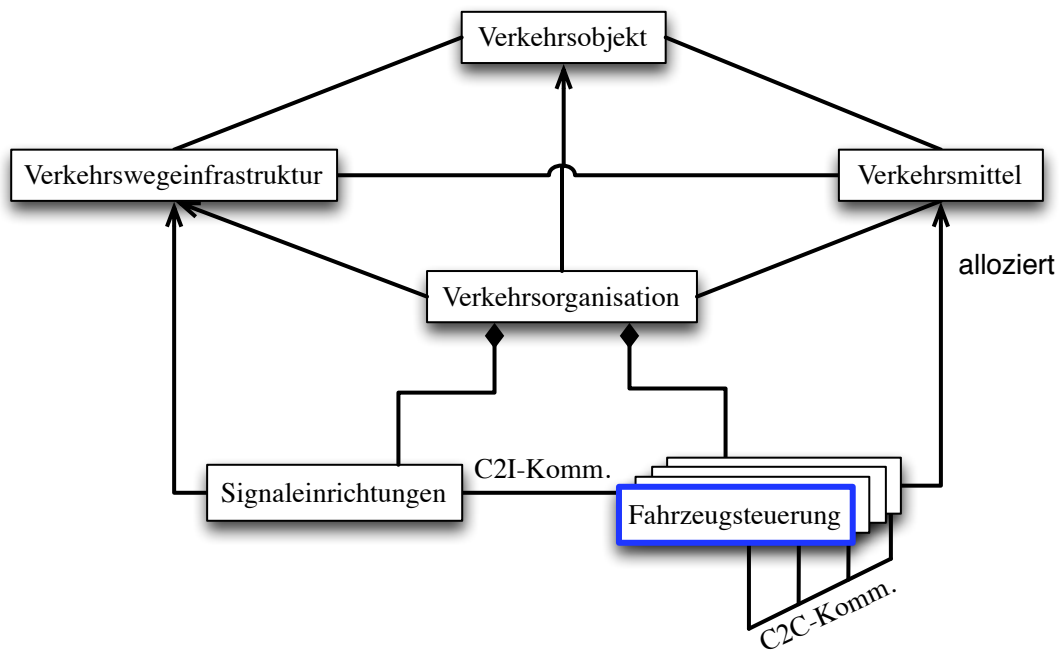


Abbildung 2.1: Die Konstituenten des Verkehrs als Grundlage für den Systementwurf, in Anlehnung an [125, S. 29]

Die Verkehrsorganisation kann in die Elemente der Signaleinrichtungen und der Fahrzeugsteuerungen dekomponiert werden, welche die dortigen prozeduralen Abläufe hervorrufen. Die Signaleinrichtungen sind hierbei der Verkehrsweeinfrastuktur zuzuordnen und umfassen z.B. Lichtsignalanlagen oder Wechselzeichenanlagen. Die Fahrzeugsteuerungen werden als Funktion in Verkehrsmitteln alloziert. Die Informationen, wie Gebote und Verbote, die seitens der Signaleinrichtungen

gesendet werden, werden seitens der Fahrzeugsteuerungen empfangen und in entsprechende Handlungen umgesetzt. Gleichzeitig können zwischen den Funktionen der Fahrzeugsteuerung Informationen ausgetauscht werden. Derzeit wird die Fahrzeugsteuerung seitens Fahrzeugführern realisiert. Diese nehmen Informationen über die Signaleinrichtungen sowie über das Verhalten anderer Fahrzeugführer wahr, z. B. in Form von Blinksignalen zur Anzeige von Fahrtrichtungsänderungen etc. Moderne Formen dieses Informationsaustauschs sind die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (*Car-to-Infrastructure-Communication (C2I)*) und die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (*Car-to-Car-Communication (C2C)*), wie sie in Abbildung 2.2 mittels Assoziationen angedeutet sind.

Um das Verkehrsverhalten im Hinblick der Homogenisierung, Kollisionsfreiheit und Verkehrsflusssteigerung zu verbessern, ist es notwendig, die Verkehrsorganisation konzeptionell anzupassen. Dies kann durch die Anpassung der Signaleinrichtungen oder der Fahrzeugsteuerungen geschehen. Konventionell können die Fahrzeugsteuerungen einerseits durch neue Regularien und Gesetze sowie durch eine angepasste Fahrerausbildung beeinflusst werden. Technologiebasiert erfolgt die Anpassung von Fahrzeugsteuerungen derzeit durch Fahrerassistenzsysteme. Eine konsequente Weiterentwicklung dieses technologiebasierten Ansatzes ist das Ersetzen der Fahrzeugsteuerung durch die abstrakte Funktion eines Fahrzeugagenten. Im Hinblick auf eine Verringerung des Aufwandes bezüglich der Anpassung der Verkehrswegeinfrastruktur wird in den anschließenden Betrachtungen auf die Kommunikation über C2I mit Signaleinrichtungen verzichtet und der Fokus auf untereinander kommunizierende Fahrzeugagenten gelegt, die funktional auf entsprechenden Verkehrsmitteln alloziert sind.

2.2 Konzept von Fahrzeugagenten

Das Ersetzen der konventionellen Fahrzeugsteuerung als Prinzip der Verkehrsorganisation durch das Konzept von Fahrzeugagenten bedeutet den Entwurf eines Multiagentensystems (MAS) für die Anwendungsdomäne des Autobahnverkehrs. Die hier genutzte Bezeichnung *Fahrzeugagent* soll im vorliegenden Kontext andeuten, dass die Funktionen des Agenten in den Verkehrsmitteln, d. h. den Fahrzeugen, zu allozieren sind. Die Agenten stellen in einem Multiagentensystem interagierende Einheiten dar, die unter Nutzung gemeinsamer Ressourcen, d. h. den Infrastruktureinrichtungen

gen, Handlungen vollziehen. Ein Agent hat nach Weiss [155] die folgenden zentralen Eigenschaften:

- Er ist autonom agierend.
- Er verfügt über eine Regelbasis und ist zielorientiert.
- Er interagiert mit anderen Agenten.
- Er ist mobil.

Die Regelbasis umfasst einen Satz von Regeln unter denen der Agent in der Lage ist zu handeln. Eine Interaktion mit anderen Agenten ist eine Handlung eines Agenten aufgrund vorheriger Kommunikation mit anderen Agenten. Ist aufgrund der Kommunikation eine Abstimmung zwischen Agenten erfolgt und handelt ein Agent aufgrund dieser, so handelt es sich um eine koordinierte Interaktion bzw. um eine Kooperation zwischen Agenten. Grundsätzlich lassen sich *homogene* von *heterogenen* Multiagentensystemen unterscheiden. Bei einem homogenen MAS verfügen die Agenten über eine identische Regelbasis, während bei einem heterogenen MAS sich die jeweilige Regelbasis von Agent zu Agent unterscheiden kann.

Unter diesen Aspekten kann auch der derzeitige Straßenverkehr als Multiagentensystem interpretiert werden. Hier wird die Funktion des Fahrzeugagenten durch den/die Fahrzeugführer/in realisiert. Aufgrund der Tatsache, dass diese sich in ihrem Handeln unterscheiden (vgl. deviantes Verhalten), ist der derzeitige Verkehr als ein heterogenes MAS anzusehen. Die Kommunikation ist jedoch auf den Austausch von optischen Signalen reduziert, sofern nicht Fahrerassistenzsysteme dem Fahrzeugführer zusätzliche Daten zur Verfügung stellen.

Ein zukünftiger Straßenverkehr, der durch Fahrzeugagenten mit identischer Regelbasis erzeugt wird, wäre daher als ein homogenes Multiagentensystem zu bezeichnen.

Es existieren insbesondere in der Informatik unterschiedliche Metamodelle von Agenten, wie z. B. in [20, 42, 89, 137]. Grundsätzlich lassen sich nach [43] agentenzentrierte, sog. *Agent Centred MAS* (ACMAS), von organisationszentrierten, sog. *Organization Centered MAS* (OCMAS), Ansätzen unterscheiden. Agentenzentrierte Ansätze verfügen hiernach über signifikante Nachteile gegenüber organisationszentrierten Ansätzen. Ihre wesentlichen Eigenschaften liegen darin, dass sämtliche Aufgaben, Funktionen und Verantwortlichkeiten beim Agenten liegen und alle Dienste

jedem anderen Agenten über Kommunikation zur Verfügung stehen. Hieraus ergäbe sich insbesondere der Nachteil, dass die Muster und Auswirkungen der Interaktionen inhärent unvorhersehbar sind. Insbesondere das Verhalten des Gesamtsystems vorherzusehen sei extrem schwierig, wenn nicht gar unmöglich, und zwar aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines emergenten und ungewünschten Verhaltens. In [43] wird diesbezüglich auf [80] verwiesen und weitere Nachteile von ACMAAS aufgeführt, wie z. B. die fehlende Modularität oder die fehlende Sicherheit gegenüber Piraterie. Diese Nachteile sollen durch ein organisationszentriertes Konzept aufgehoben werden. Als Organisation wird in [80] auf einer Definition nach Gasser [53] aufgebaut und unter diesem Begriff eine Kollektion an Rollen verstanden, die sich in bestimmten Beziehungen zueinander befinden und aus systematisch institutionalisierten Mustern und Interaktionen mit anderen Rollen bestehen. Darüber hinaus sollen Organisationen über die Möglichkeit verfügen, in Unterorganisationen unterteilt werden zu können. Diese werden dort Gruppen genannt, die sich auch überlagern können. Ein Modell eines OCMAAS wurde in [43] unter dem Namen AGR (Agent, Group, Role) vorgestellt. Dort spielt ein Agent eine bestimmte Rolle in einer Gruppe und kann gleichzeitig Mitglied in mehreren Gruppen sein. Eine Gruppe selbst ist definiert durch Agenten, welche gemeinsame Attribute teilen. Agenten können miteinander jedoch nur kommunizieren, wenn sie derselben Gruppe angehören. Die Rolle ist definiert als „funktionale Position“ eines Agenten in einer Gruppe. Ein Agent muss mindestens eine Rolle spielen. Die Rollen können mittels Attributen beschrieben werden sowie mittels strukturellen Grenzen zwischen den Rollen. Für einen kooperativen Straßenverkehr erscheint es sinnvoll, Prinzipien des AGR-Konzepts insofern zu übernehmen, als jedes Fahrzeug so attribuiert wird, dass sich Fahrzeuge zu Gruppen zusammenfassen lassen, wobei die physikalischen Parameter der Fahrzeuge berücksichtigt werden.

Im Folgenden soll das Konzept des Fahrzeugagenten auf dem Systembegriff nach Schnieder [125, S. 17] aufgebaut werden, wobei gleichzeitig zwecks Verhinderung eines unerwünschten emergenten Verhaltens eine Gruppenstruktur eingeführt wird. Wie bereits in Abschnitt 1.3 angedeutet wurde, besitzt ein System die Systemeigenschaften *Struktur*, *Zustand*, *Funktion* und *Verhalten*. Diesen Eigenschaften können bestimmte Merkmale zugeordnet werden, welche die Eigenschaften charakterisieren [141]. Diese Zuordnung soll nun für das System eines Fahrzeugagenten durchgeführt werden, um schließlich die Realisierung der Merkmale durch technologische Ressour-

cen auszuweisen.

Das Vorgehen orientiert sich an der Darstellung des Systemmodells eines Fahrzeugagenten aus Abbildung 2.2 als UML-Klassendiagramm, beginnend bei der Formulierung des Zustands eines Fahrzeugagenten, über das Verhalten hin zu den Funktionen, die das Verhalten und bestimmte Zustände realisieren sollen. Die Struktur eines Fahrzeugagenten, die das Zusammenwirken seiner Komponenten im Sinne technischer Ressourcen beschreibt, wird hier nicht explizit dargestellt. Hierzu sei auf den Übersichtsartikel zur technischen Realisierung von Funktionen autonomer Fahrzeuge in [15] verwiesen.

2.2.1 Zustand eines Fahrzeugagenten

Der Zustand ist, wie in [125], dargestellt eine im Umfang weit gefasste Systemeigenschaft, die im Gegensatz zum Zustandsbegriff aus der Regelungstechnik nicht nur Variable sondern auch weitere Merkmale beinhaltet, die nicht nur den energetischen Zustand beschreiben, sondern auch informationellen Charakter besitzen, wie es bei Parametern eines Systems der Fall ist. Hierdurch ist es beispielsweise möglich, die zeitabhängige Änderung von Parametern, wie z. B. der Federsteifigkeit aufgrund der Alterung eines Bauteils, ebenfalls als Charakteristikum des Zustands des Systems darzustellen, was weniger den physikalischen (energetischen) Zustand beschreibt als die Information über Parameter, welche die Dynamik beeinflussen können.

Der Zustand eines Fahrzeugagenten besitzt daher die Merkmale *Variablen* und *Parameter*, die hier als *Attribute* bezeichnet werden. Über diese Charakteristika hinaus werden die *Ziele* eines Fahrzeugagenten ausgewiesen. Im Gegensatz zu den Variablen besitzen sie einen stationären Charakter und werden hier nicht als Parameter aufgefasst, da sie nicht direkt dem Modell des Fahrzeugs entstammen und in diesem Sinne keinen physikalischen Charakter besitzen. Die Ziele sind eher von übergeordneter Natur und ergeben sich aus den Anforderungen an einen zukünftigen Straßenverkehr.

Variablen

Die Variablen, die den Zustand eines Fahrzeugagenten charakterisieren, sind im Allgemeinen genau diejenigen, welche eindeutig die Dynamik eines Fahrzeugagenten repräsentieren. Hierzu zählen im Allgemeinen auch die Zustandsgrößen, wie sie in

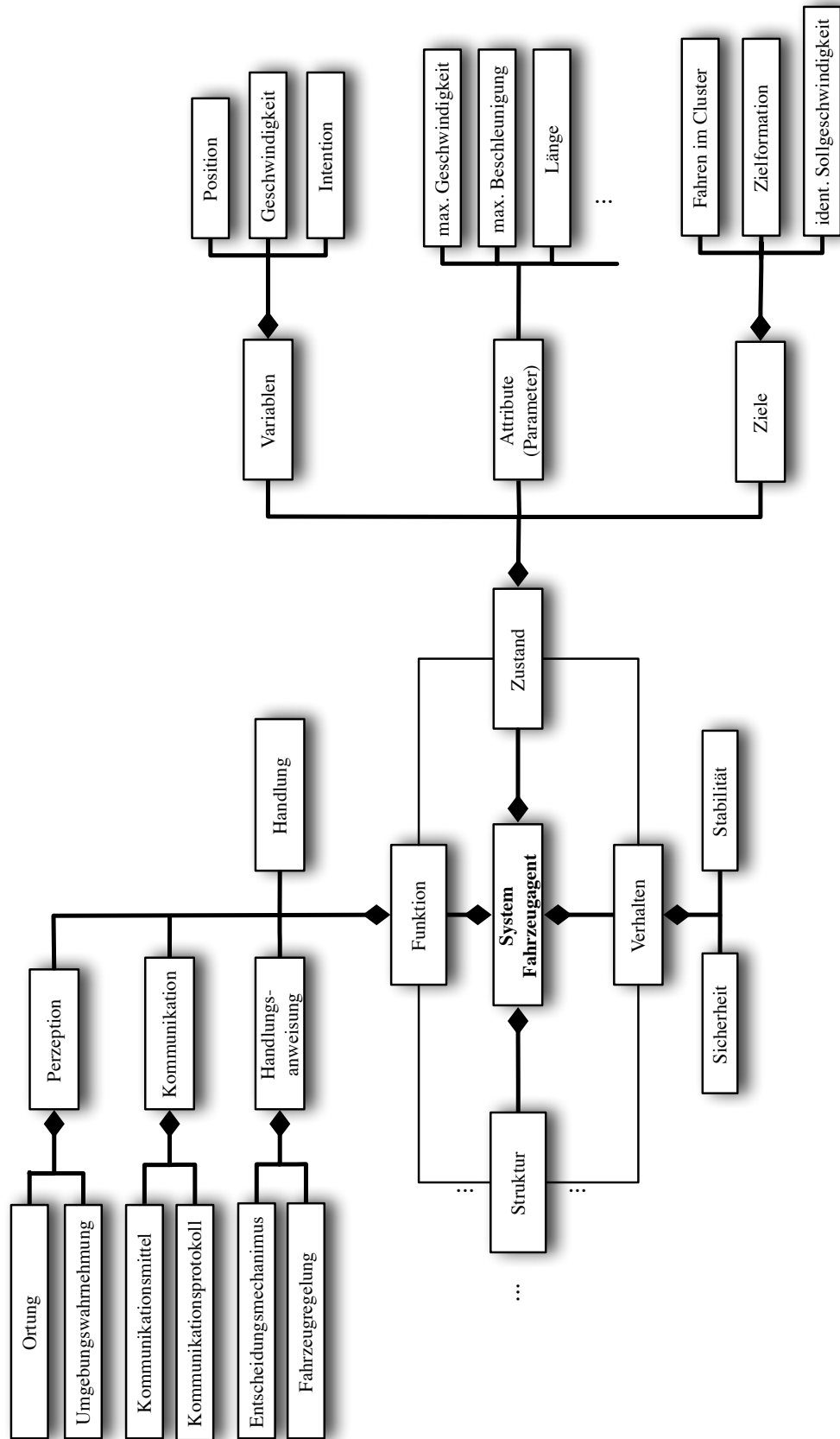


Abbildung 2.2: Systemmodell eines Fahrzeugagenten

Fahrzeugmodellen auftreten, wie z. B. der Schwimmwinkel, der Gierwinkel oder der Wankwinkel. Für den hier betrachteten Anwendungsfall werden allein diejenigen Zustandsgrößen eines Fahrzeugagenten betrachtet, die gleichzeitig das Verkehrsgeschehen beschreiben. Dies sind insbesondere die Position und die Geschwindigkeit von Fahrzeugagenten, da diese zu aggregierten Verkehrsgrößen wie Fluss und Dichte überführt werden können, vgl. [23, S. 19]. Um die Position zu charakterisieren, wird die Längs- und Querposition herangezogen. Die Geschwindigkeit ist in Fahrtrichtung anzusehen.

Definition 2.1. Jedes Fahrzeug kann durch einen Zustandsvektor

$$\mathbf{x}_i := \begin{bmatrix} x_{q_i} \\ x_{l_i} \\ v_i \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

charakterisiert werden. Er verfügt über die Zustandsgrößen

x_{q_i}	Querposition
x_{l_i}	Längsposition
v_i	Geschwindigkeit.

Diese Zustandsgrößen sind auf den Schwerpunkt eines Fahrzeugs bezogen. Die Positionsinformation wird in einem Vektor $\tilde{\mathbf{x}}_i := [x_{q_i}, x_{l_i}]^T$ zusammengefasst. Die Längsposition bezieht sich auf den Fahrbahnverlauf.

Neben diesen Zustandsvariablen, die physikalischen Ursprungs sind, können weitere definiert werden, die einen rein informationellen Charakter besitzen. Hierzu zählt die eingeführte Variable der *Intention*. Sie bezeichnet das Vorhaben eines Fahrzeugagenten aufgrund der eigenen Routenplanung hinsichtlich Abfahrten oder Auffahrten, der Wunschgeschwindigkeit und der übergeordneten Ziele des Multi-Agenten-Systems. Da die Intention sich in Abhängigkeit der Verkehrssituation ändern kann, wird diese nicht den (statischen) Zielen zugeordnet, sondern den Variablen.

Attribute (Parameter)

Als Attribute werden statische Parameter eines Fahrzeugagenten aufgefasst. Zu diesen gehören die maximale Beschleunigung, die maximale Geschwindigkeit sowie die

Länge l_i eines Fahrzeugagenten. Diese Attribute werden genutzt, um Fahrzeugagenten zu Gruppen, sog. Clustern zusammenzufassen.

Hierzu wurden in [68] die Begriffe Fahrzeugklasse und Cluster eingeführt, die jeweils dem Gruppenbegriff nach dem AGR-Schema entsprechen. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass es bei der Einführung von Attributen und Organisationshierarchien zu einer impliziten Überlagerung mit den Zielen des Multiagentensystems und auch mit den Zielen des Agenten selbst kommt. Nur durch das Wissen um die Ziele des Multiagentensystems und der abgeleiteten agentenlokalen Ziele lassen sich sinnvolle Organisationsschemata entwerfen, die in der Lage sind, ein gewünschtes Systemverhalten zu erzeugen. Somit sind diese eingeführten Gruppenbegriffe unter den Zielen des sich anschließenden Abschnitts zu betrachten.

Definition 2.2 (Attribut). Ein Attribut A_κ^j eines Fahrzeugagenten j ist eine physikalische Größe mit Betrag und Einheit, die dazu dient die Fahrzeugdynamik zu beschreiben. Es existieren $\kappa = 1 \cdots n$ Attribute. Hierunter fallen insbesondere die Länge, die maximale Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und die maximale Geschwindigkeit.

Definition 2.3 (Attributdistanz). Die erlaubte Distanz zwischen gleichen Attributen A_κ^j unabhängig von j heißt Δ_κ . Die Attributdistanzen sind Designparameter.

Definition 2.4 (Ähnlichkeit und Fahrzeugklasse). Sei $V = \{1, \dots, p\}$ eine Menge von p Fahrzeugen. Jedes Fahrzeug i habe die identische Anzahl n gegebener Attribute A_1^i, \dots, A_n^i . Sei $\Delta_1, \dots, \Delta_n > 0$. Die Menge V heißt ähnlich oder *Fahrzeugklasse*, wenn für alle $1 \leq \kappa \leq n$ und alle Fahrzeuge $i, j \in V$ die Bedingungen $|A_\kappa^i - A_\kappa^j| \leq \Delta_\kappa$ erfüllt ist.

Definition 2.5 (Cluster). Eine Menge an Fahrzeugen V mit ähnlichen Attributen heißt *Cluster* wenn der assoziierte Kommunikationsgraph $G = (V, E)$ zusammenhängend ist und kein Graph \hat{G} existiert, sodass G Subgraph von \hat{G} ist.

Durch diese Definitionen werden zwei grundlegende Begriffe eingeführt. Zum einen der einer Fahrzeugklasse, der es ermöglicht eine physikalisch basierte Einteilung der Fahrzeugagenten vorzunehmen, zum anderen der eines Clusters, der nur Fahrzeuge einer Fahrzeugklasse umfasst und auf der Kommunikationsmöglichkeit zwischen Fahrzeugagenten basiert. Ein Cluster an Fahrzeugen kann nach der Definition nur existieren, wenn diese in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren. Dies

wird dadurch ermöglicht, dass sich jedes betreffende Fahrzeug innerhalb des Kommunikationsradius eines anderen Fahrzeugs befindet, sodass im dazugehörigen Kommunikationsgraphen ein Spannbaum existiert. Dies bedeutet, dass jeder Fahrzeugagent der betreffenden Fahrzeugklasse in der Lage ist, über einen Pfad mit jedem anderen Fahrzeugagenten zu kommunizieren. Gleichzeitig befinden sich keine Fahrzeugagenten einer anderen Fahrzeugklasse innerhalb dieses Kommunikationsgraphen, da ansonsten der betreffende Kommunikationsgraph Subgraph eines übergeordneten Kommunikationsgraphen wäre. Um dies zu erzeugen, ist eine räumliche Trennung der Fahrzeuggruppen nach Fahrzeugklassen notwendig. Dies entspricht einer Organisationsform nach dem AGR-Schema. Die wechselseitige Beziehung zwischen Fahrzeugagenten einer Fahrzeugklasse und einem Cluster wird in Abbildung 2.3 mit Hilfe einer Assoziationsklasse ausgedrückt, die den Kommunikationsgraphen repräsentiert. Die Rolle eines Fahrzeugagenten ist zum einen abhängig von der Fahrzeugklasse und dem jeweiligen Cluster, zum anderen von den Umgebungsbedingungen – respektive Verkehrssituationen – und Intentionen des Fahrzeugagenten.

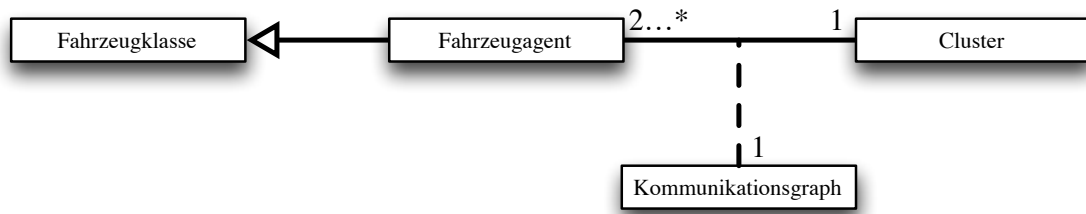


Abbildung 2.3: Wechselseitige Beziehung zwischen Fahrzeugagenten und Cluster mittels einer Assoziationsklasse

Ziele

Die Ziele lassen sich in globale und lokale Ziele unterteilen. Globale Ziele betreffen das Multiagentensystem in seiner Gesamtheit und werden durch globale Zustandsgrößen des Straßenverkehrs ausgedrückt, während lokale Ziele in den Zustandsgrößen eines Fahrzeugagenten ausgedrückt werden. Außerdem kann für jede Art der Zustandsgrößen in stationäre Zielzustände und die Spezifikationen des zeitlichen oder räumlichen Verlaufs von Zustandsübergängen unterschieden werden. Es ist vorerst jedoch notwendig, die globalen Ziele, die einen neuartigen verbesserten Straßenverkehr beschreiben, auf lokale Ziele eines Fahrzeugagenten zu überführen. Dieser Abgleich zwischen globalen und lokalen Zielen ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Abgleich von globalen und agentenlokalen Zielen

Globale Ziele	Abgeleitete lokale Ziele eines Fahrzeugagenten
Homogenität des Verkehrsverhaltens	identisches, deterministisches Verhalten aller Fahrzeugagenten (FA): <ul style="list-style-type: none"> • Identische Regelbasis • Identische Regelungen <hr/> Cluster-Konzept: <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugagenten ähnlicher Attribute fahren räumlich alloziert in Formationen
Erhöhung des Flusses	Definiertes Fahren im Cluster: <ul style="list-style-type: none"> • Formationen maximaler Raumausnutzung (Dichte) • Identische, hohe Geschwindigkeit
Unfallfreiheit	Formationsstabilität: <ul style="list-style-type: none"> • Inhärente Kollisionsvermeidung

Die globalen Ziele des zu erzeugenden Verkehrsverhaltens liegen in dessen Homogenität, der Erhöhung des Flusses und gleichzeitiger Unfallfreiheit. Die Homogenität des Verkehrsverhaltens wird durch ein identisches Verhalten aller Fahrzeugagenten erzeugt. Dies bedeutet, dass sie über eine identische Regelbasis für die Entscheidungsfindung verfügen müssen und die implementierten Regelungen gleiche Trajektorienverläufe erzeugen. Letzteres ist aufgrund der physikalischen Parameter einzelner Fahrzeugagenten nicht für alle möglich, so dass es sinnvoll ist, Fahrzeuge zu Fahrzeuggruppen, sog. *Clustern*, zusammenzufassen. Dies bezeichnet Fahrzeugagenten, die über ähnliche Attribute verfügen und sich räumlich alloziert in Formationen fortbewegen. Durch diese räumliche Zusammenfassung von ähnlichen Fahrzeugagenten wird nicht nur pro Cluster der Verkehr homogenisiert, sondern mit koordinierten Überholvorgängen von langsamen durch schnellere Clustern auch insgesamt ein homogenes Verkehrsverhalten erzeugt.

Die Erhöhung des Verkehrsflusses wird entsprechend durch ein definiertes Fahren im Cluster realisiert. Dieses soll insbesondere dadurch charakterisiert sein, dass die zu erzeugenden Formationen von Fahrzeugagenten den verfügbaren Raum bestmöglich ausnutzen. Gleichzeitig soll für eine statische Formation eine pro Fahrzeugagent identische, der Fahrzeugklasse entsprechende Geschwindigkeit herbeigeführt werden.

Das übergeordnete Ziel der Unfallfreiheit wird pro Cluster durch Formationsstabilität herbeigeführt, die inhärent Kollisionen vermeidet. Die Ziele sind entsprechend durch geeignete Funktionen seitens eines Fahrzeugagenten zu realisieren. Sie korrespondieren direkt mit den Kriterien an eine „Computersteuerung“, die von Helbing in [63, S. 140-142] formuliert wurden. Dort wird die Minimierung von Unfallrisiken mit der Vermeidung von plötzlichen Dichteänderungen gleichgesetzt. Daneben soll die mittlere Geschwindigkeit als auch der Verkehrsfluss maximiert werden, was von Helbing als einander widersprechende Anforderungen im Sinne eines Zielkonfliktes beschrieben wird. Dies liegt jedoch an den dort vorgenommenen Annahmen für die stationären Zustände im Straßenverkehr.

In den folgenden Abschnitten werden die Ziele hinsichtlich der stationären Zustände und danach hinsichtlich der dynamischen Zustandsübergänge diskutiert. Dort wird jeweils der Zusammenhang zwischen makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsgrößen untersucht und hieraus genauer abgeleitet, welchen Kriterien die Funktionen des Fahrzeugagenten zu genügen haben.

Ziele stationärer Zustände. Zur Beurteilung des Straßenverkehrs wird derzeit häufig das Fundamentaldiagramm herangezogen, vgl. [63, 85, 157]. Es wurde von Greenshields eingeführt, um den Verkehrsfluss in Abhängigkeit der Dichte graphisch darzustellen [60]. Hierzu wurden zunächst von Greenshield Dichte und Geschwindigkeit in ein Diagramm eingetragen und anschließend durch die Messpunkte eine Regressionsgerade gelegt. Durch Substitution der Dichte mittels des Zusammenhangs $k = Q/V$ (Dichte entspricht Fluss geteilt durch mittlere Strömungsgeschwindigkeit) konnte ein parabelförmiger Zusammenhang zwischen dem Fluss Q und der Dichte k ermittelt bzw. postuliert werden. Dies bestätigt sich aber nicht durch die Auswertung entsprechender Messdaten, wie es z. B. von Helbing in [63, S. 87] gezeigt wurde. Helbing stellt zum einen fest, dass der Verlauf des Flusses über der Dichte zum einen stark von der genutzten Definition der Dichte abhängig ist. Zum anderen konstatiert er einen Verlauf, bei dem sich für mittlere Dichten ein Plateau zeigt und der Fluss sich kaum ändert. Außerdem ist eine starke Streuung der Messgrößen festzustellen.

Wirth [157] äußert sich kritisch zu den so erstellten Fundamentaldiagrammen, insbesondere wenn der Verlauf des Flusses über der Dichte durch einen kontinuierlichen Kurvenzug angenähert wird. Hierdurch werde suggeriert, dass „der Verkehrszustand sich auf der diskreten Linie hin- und herbewegen könnte“. Dies sei ein Widerspruch

zur Kontinuitätsgleichung 2.2, die in jedem Falle erfüllt sein müsse, sofern ein Richtungsfahrbahnabschnitt einer Autobahn vorliegt, der weder über Auf- noch über Abfahrten verfügt. Die partiellen Ableitungen müssen in jedem Falle unterschiedliche Vorzeichen haben. In den dort weiter betrachteten dynamischen Fundamentaldiagrammen, die gerade Zustandsübergänge von Fluss und Dichte durch Kurvenzüge darstellen, können laut Aussage von Wirth gem. der Kontinuumsgleichung (Gleichung 2.2) nur Kurvenzüge negativer Steigung vorkommen [157].

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

In [56] werden diese Feststellungen Wirths widerlegt und gezeigt, dass die in [157] dargestellten dynamischen Fundamentaldiagramme keinen Widerspruch zur Kontinuumsgleichung darstellen. Das Fundamentaldiagramm des Straßenverkehrs stellt hiernach das stationäre Verhalten von Dichte und Fluss dar (vgl. [56, 63, 157]) und keine Zustandsübergänge. Gleichzeitig wird bei Betrachtung von dessen Punktwolken das im Straßenverkehr derzeit vorliegende stochastische Individualverhalten der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten offenbar. Laut [56] stelle das Fundamentaldiagramm als „empirischer Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Verkehrsdichte ein wichtiges und aussagekräftiges Hilfsmittel für die Analyse und Modellierung des Verkehrsflusses auf Straßen und Autobahnen“ dar. Die Modellierung durch eine geeignete „Modellfunktion“ ist laut Geistefeldt eine „vereinfachende Abstraktion des realen Verkehrsflusses, die für viele ... Anwendungen hinreichend genau ist“. Die Darstellung durch einen „Kurvenzug“ hingegen liefere „aussagekräftige Schätzwerte der im Mittel zu erwartenden Kapazität von Straßen und Autobahnen“.

Bei einem automatisch geregelten Straßenverkehr, wie er in dieser Arbeit angestrebt wird, würden diese stochastischen Einflüsse wegfallen. Durch Regelungsalgorithmen ist es möglich, ein definiertes Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten der Fahrzeuge zu erzeugen.

Nach Helbing besteht ein Zielkonflikt zwischen der Maximierung des Verkehrsflusses und der gleichzeitigen Maximierung der mittleren Geschwindigkeit aufgrund des konstatierten Verlaufs des Fundamentaldiagramms. Der Verkehrsfluss Q erhält seinen höchsten Wert bei einer Dichte von ungefähr 30 Fahrzeugen pro Kilometer, während die mittlere Geschwindigkeit ihr Maximum auf leeren Straßen erreicht [63, S. 142 ff.]. Durch automatisierte Fahrzeuge kann der Verlauf des Fundamentaldiagramms jedoch beeinflusst werden, indem definierte stationäre Zustände für

Längsabstand und Geschwindigkeit bei jedem Fahrzeugagenten identisch einprogrammiert werden. Es könnte zu einem gewünschten, bislang nur theoretischen, stationären Verhalten von Verkehrsfluss und Dichte führen. Zu einem solchen Verhalten macht Helbing ebenfalls Untersuchungen, siehe [63, S. 140 ff.]. Dort wird von einem Fahrstreifen ohne Auf- und Abfahrten ausgegangen, auf welchem sich alle Fahrzeuge mit derselben Geschwindigkeit und demselben Längsabstand fortbewegen. Zur Modellierung dieses stationären Zustands wird ein linearer Sicherheitsabstand S in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit V angenommen, wie in Gleichung 2.3. T_r bezeichnet hier die hypothetische Reaktionszeit eines Fahrers, in unserem Falle der Fahrzeugelektronik, während S_0 einem Mindestsicherheitsabstand entspricht.

$$S(V) = S_0 + T_r \cdot V \quad (2.3)$$

Unter der Annahme, dass die Dichte k höchstens so groß sein kann wie der Kehrwert des Mindestsicherheitsabstandes, kann für die theoretische Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Dichte die Gleichung 2.4 ermittelt werden.

$$V(k) = \frac{1}{T_r} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_{\max}} \right) \quad \text{mit} \quad k_{\max} = \frac{1}{S_0} \quad (2.4)$$

Es zeigt sich eine hyperbelförmige Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit von der Dichte. Wird die Relation aus der Hydrodynamik herangezogen, wonach sich der Fluss aus der Multiplikation von Geschwindigkeit und Dichte ergibt ($Q = k \cdot V$), so erhält man nach Gleichung 2.5 eine lineare Beziehung zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte.

$$Q = \frac{1}{T_r} - \frac{k}{k_{\max} \cdot T_r} \quad (2.5)$$

Offenbar nimmt dann der Fluss vom Maximum $1/T_r$ mit steigender Dichte ab. Die Steigung dieser Geraden entspricht $\frac{-1}{k_{\max} \cdot T_r}$. Es kann somit festgestellt werden, dass das Maximum des erreichbaren Flusses durch die Reaktionszeitkonstante T_r gegeben ist. Außerdem würde sich ein dichteunabhängiger Fluss ergeben, wenn die maximale Dichte k_{\max} gegen unendlich streben würde. Dies entspricht nach Gleichung 2.4 einer Minimaldistanz zwischen den Fahrzeugen von $S_0 = 0$ m, was im derzeitigen Verkehr nicht möglich erscheint. Jedoch kann durch die Homogenisierung des Fahrzeugverhaltens eine bestimmte Reaktionszeit sowie ein Mindestabstand pro Fahrzeug erzwungen werden. Dies wird durch fahrzeuglokale elektronische Regelungseinrich-

tungen ermöglicht und sichergestellt. Stellt man den von Helbing angenommenen theoretischen Verlauf der Geschwindigkeit-Dichte-Relation aus [63, S. 141] nach, so können $T_r = 0.72\text{s}$ und $k_{\max} = 160\text{Fzg/km}$ ermittelt werden. Der hiernach erzielte theoretische Fluss nimmt linear mit der Dichte ab, und zwar von 5000 Fzg/h auf 0 Fzg/h . Abbildung 2.4 zeigt links den von Helbing angenommenen theoretischen Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Dichte und rechts den sich daraus ergebenden theoretischen Verlauf des Verkehrsflusses in Abhängigkeit der Dichte. Der maximal erreichbare Fluss liegt hingegen im *derzeitigen* Verkehrsgeschehen laut Helbing [63, S. 87] bei ca. 30 Fzg/km mit ca. 2200 Fzg/h . Allein diese Zahlen zeigen das Potential eines automatisierten homogenen Straßenverkehrs auf.

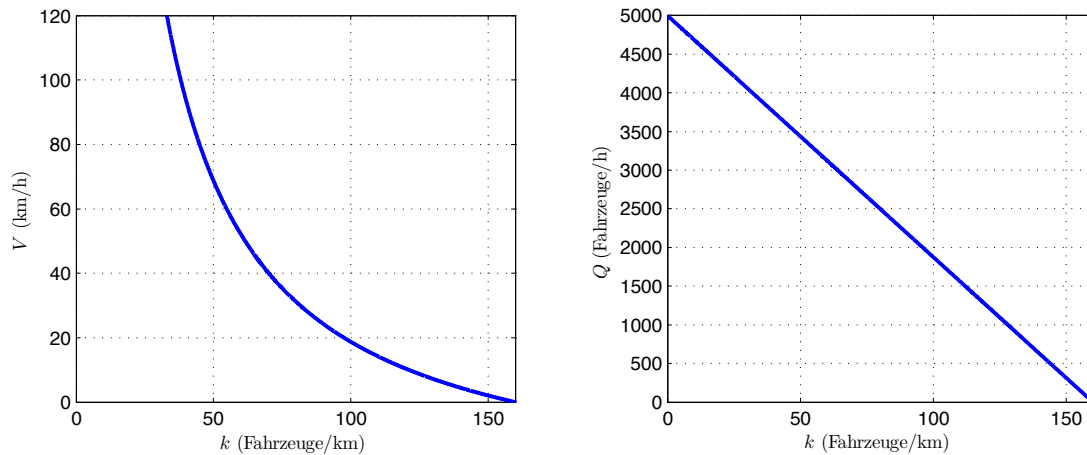


Abbildung 2.4: Theoretischer Verlauf der mittleren Geschwindigkeit (links) nach [63, S. 141] und des damit verbundenen theoretischen Verkehrsflusses (rechts) in Abhängigkeit der Dichte

Es stellt sich also die grundsätzliche Frage, welche stationären Zustände, ausgedrückt durch mittlere Geschwindigkeit, Fluss und Dichte, erreicht werden sollen. Wünschenswert wäre die unabhängige Vorgabe eines Verkehrsflusses und einer mittleren Geschwindigkeit. Dies würde die eingangs formulierte Relation zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Distanz relativieren. Dies ist jedoch mit dem Einsatz elektronischer Regeleinrichtungen möglich und wird nachfolgend beschrieben. Denn das Modell aus Gleichung 2.3 basiert auf der Annahme, dass alle Fahrzeuge mit derselben Geschwindigkeit unterwegs sind und nun ein voraus fahrendes Fahrzeug mit einem Bremsmanöver beginnt. Die Zeit bis das Ego-Fahrzeug bemerkt, dass das ihm vorausfahrende Fahrzeug bremst, ist gerade T_r , d.h. die in dieser Zeit zurück-

gelegte Strecke ist $T_r \cdot V$. Wie gesehen, wird diese Strecke zumeist noch eine Sicherheitsdistanz S_0 wie in Gleichung 2.3 hinzugefügt. Aus ingenieurmäßiger Sicht kann der Betrag der Sicherheitsdistanz nicht auf einer formalen Grundlage festgelegt werden, weshalb auf die Größe S_0 im Folgenden verzichtet werden soll. Dann entspricht im Fall einer Vollbremsung des voraus fahrenden Fahrzeugs die Zeit T_r der Zeit bis zur Kollision, der sog. *Time To Collision* (TTC). Sie ist nach [6] analog zu den obigen Darstellungen als Quotient aus Distanz und Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Fahrzeugen definiert. Wie bereits festgestellt, wird unter der Annahme $S_0 = 0$ ein konstanter Fluss der Größe $1/T_r$ aufgeprägt. Soll dieser jedoch frei vorgegeben werden können, entspricht dies formal einer Variation von T_r . Werden Fluss und mittlere Geschwindigkeit im regelungstechnischen Sinne als Sollgrößen vorgegeben, kann aufgrund des Zusammenhangs aus der Hydrodynamik $Q = k \cdot V$ und der hier vorgenommenen Annahme für die Dichte $k = 1/S$ der stationäre Zusammenhang zwischen notwendiger Distanz S und gewünschter Geschwindigkeit V sowie gewünschtem Fluss Q mit Gleichung 2.6 beschrieben werden.

$$S = \frac{V}{Q} \quad (2.6)$$

Als notwendige Randbedingung muss jedoch sichergestellt werden, dass die dann durch S und V gegebene äquivalente Reaktionszeit T_r größer ist als die durch das elektronische Regelsystem realisierte Reaktionszeit $T_{r_{min}}$, vgl. Gleichung 2.7. Außerdem muss sichergestellt sein, dass das jeweilige Folgefahrzeug dann dieselbe Verzögerung hat, wie das vorausfahrende, um dem Ziel der Kollisionsvermeidung zu genügen. Letzteres wird über ein hier zum Einsatz kommendes Kommunikationsnetzwerk ermöglicht, über das Beschleunigungsdaten ausgetauscht werden können.

$$T_r = \frac{S}{V} \geq T_{r_{min}} \quad (2.7)$$

Gleichzeitig gelten diese stationären Zusammenhänge nur, wenn seitens der Fahrzeugagenten eines Clusters eine gemeinsame Geschwindigkeit und ein pro Fahrzeugagent identischer Abstand zum Vorausfahrenden eingehalten wird. Es ist außerdem zu berücksichtigen, dass die bisher formulierten Zusammenhänge allein für einen Fahrstreifen gelten. Helbing definiert bereits in [63, S. 149] eine Dichte durch Multiplikation der mittleren Dichte pro Fahrstreifen mit der Fahrstreifenanzahl. Um dies auf das Konzept eines Clusters zu übertragen, wurde eine alternative Definition der

Dichte formuliert.

In [68] wird ein Dichtemaß eingeführt, das Fahrzeugformationen im Sinne eines Clusters über mehrere Fahrstreifen charakterisiert. Dort wurde die folgende Definition vorgenommen:

Definition 2.6. Die Dichte ρ ist definiert als

$$\rho = \frac{n_C}{a},$$

wobei n_C die Anzahl an Fahrzeugen in einem Cluster repräsentiert und $a = q \cdot b \cdot z$ das Flächenquadrat ist, das vom Cluster befahren wird. Hier ist q die Fahrstreifenanzahl und z die Breite eines Fahrstreifens. Es wird angenommen, dass z kleiner oder gleich der Fahrzeuglänge l_i ist. Der Faktor b ist die Längsdistanz vom vordersten zum hintersten Fahrzeugagenten, die wie folgt definiert ist:

$$b := \max_{i,j} \|x_{l_i} - x_{l_j}\| + \frac{l_i}{2} + \frac{l_j}{2} \quad (2.8)$$

Ist n_C die Fahrzeuganzahl eines Clusters C und q die Anzahl an Fahrstreifen, dann ist die höchste Dichte ρ genau dann erreicht, wenn die Differenz zwischen der maximalen Fahrzeuganzahl eines Fahrstreifens und der minimalen Fahrzeuganzahl eines Fahrstreifens kleiner oder gleich eins ist. Durch passende Entscheidungsmechanismen für Aufholmanöver und Fahrstreifenwechsel kann die Maximierung dieser Dichte ρ erzielt werden. Das Erreichen dieses Ziels kann hiermit anhand der Anzahl an Fahrzeugen pro Fahrstreifen überprüft werden.

Ziele bei Zustandsübergängen. Für die Formulierung von Zielen bezüglich der Zustandsübergänge wird zunächst betrachtet, wie eine Modellierung der Zusammenhänge zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsgrößen vorgenommen werden kann. Danach wird reflektiert, inwiefern das rezipierte Vorgehen auf das Cluster-Konzept angewendet werden kann und eine Schlussfolgerung mit der Angabe von Zielen in Form von Anforderungen an Zustandsübergänge mittels der Kontinuumsgleichung formuliert.

Die Zustandsübergänge lassen sich sowohl mittels makroskopischer also auch mikroskopischer Verkehrsgrößen (Zustandsgrößen) angeben. Die Zusammenhänge im Makroskopischen führen auf partielle Differenzialgleichungssysteme, während jene im Mikroskopischen Differenzial- oder, im zeitdiskreten Falle, Differenzengleichungen

mit konzentrierten Variablen darstellen, die eine Modellierung des Verhaltens aller Einzelfahrzeuge ermöglichen. Helbing konstatiert in [63, S. 175], dass makroskopische Verkehrsmodelle, die das derzeitige Verkehrsgeschehen modellieren, durch mikroskopische Zusammenhänge begründet sein müssen. Dies erscheint sinnvoll, da jene definierten makroskopischen Größen, wie Dichte und mittlere Flussgeschwindigkeit, eine Aggregation bzw. Abstraktion verteilter Zustände sind, die durch Interaktionen („Wechselwirkungen“) und durch die eigene Dynamik von Fahrzeugen auf mikroskopischer Ebene hervorgerufen werden. Helbing vollzieht den Zusammenhang zwischen mikroskopischer und makroskopischer Modellierungsebene, indem er von einem vereinfachten Fahrzeugmodell auf mikroskopischer Ebene ausgeht, das die Änderung der Ego-Geschwindigkeit als Summe aus Kräften der Eigendynamik und den Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Fahrzeuge abbildet. Die Definition der Phasenraum-dichte wird anschließend zur Modellierung der Dynamik in Form von gaskinetischen Gleichungen, insbesondere der sog. *Kontinuitätsgleichung im Phasenraum*, genutzt [63, S. 179]. Dies entspricht der sog. mesoskopischen Modellierungsebene und wird unter der Annahme kollisionsartiger Paarwechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen durchgeführt. Zwei dort auftretende Terme repräsentieren direkt die über einen Raum- und Geschwindigkeitsbereich auftretende Fahrzeugdynamik durch die aufsummierten normierten Kräfte über alle Einzelobjekte. Dies ist zum einen die Divergenz der dort eingeführten Beschleunigungskraft multipliziert mit der Phasenraum-dichte sowie zum anderen die zeitliche Änderung der Phasenraum-dichte aufgrund von Wechselwirkungen.

Nun existieren unterschiedliche Ansätze für die Annahme der Beschleunigungskraft, die im systemtheoretischen Sinne die Eigendynamik des Fahrzeugs darstellt sowie für die Wechselwirkungen, um das derzeitige Verkehrsverhalten abzubilden. So geht die Modellierung des Wechselwirkungsterms für verdünnte Gase auf Boltzmann zurück, sodass auch im Verkehrsmodell von Prigogine, das nur eine Raumdimension abbildet, eine „Boltzmann-artige“ Form zur Modellierung der Phasenraum-dichteänderung durch Wechselwirkungen genutzt wird. Als Beschleunigungsterm wird dort ein Relaxationsansatz herangezogen, der die Kraft proportional zur Dichte und Geschwindigkeitsverteilung modelliert und diese gegen eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung konvergieren lässt, die nicht Teil der Fahrzeugeigenschaften ist. Paveri-Fontana hingegen modelliert die Beschleunigung proportional zur Differenz zwischen Wunschgeschwindigkeit und Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs, wie es

ebenfalls in [63] zusammenfassend dargestellt ist. Dies ist zwar ein deterministischer Ansatz für das *eigene* Fahrzeugverhalten, jedoch nicht für die Wechselwirkungen. Für die wechselwirkungsinduzierte Phasenraumdichteänderungen wird ebenfalls eine „Boltzmann-artige“ Form angenommen.

Diese mesoskopische Modellierung wird als Zwischenschritt zur Ermittlung der makroskopischen Zusammenhänge genutzt. Hierfür werden die fluiddynamischen Gleichungen gewöhnlicher Gase verwendet, siehe hierzu [63, S. 193]. Der dort formulierte Ansatz liegt in der Definition aggregierter Größen als stochastische Momente, wobei eine Boltzmann-artige Geschwindigkeitsverteilung angenommen wird, und zwar in Form der zuvor hergeleiteten Phasenraumdichte dividiert durch die Dichte selbst. Die Momente werden anschließend mit der Gleichung der zuvor hergeleiteten Phasenraumdichteänderung multipliziert und über die Geschwindigkeit integriert. Ergebnis sind eine Dichtegleichung, eine Geschwindigkeitsgleichung und im allgemeinen Falle eine Wärmeleitungsgleichung, welche im Falle des Verkehrs auch Varianzgleichung genannt wird und ein Moment zweiter Ordnung darstellt. Für unterschiedliche Näherungen der Geschwindigkeitsverteilung, z. B. dass diese ungefähr der Gleichgewichtsverteilung entspricht, erhält man die Euler-, bzw. die Navier-Stokes-Gleichungen für die Berücksichtigung der Abweichungen von der Gleichgewichtsverteilung.

Für den hier verfolgten Anwendungsfall, erscheint eine solche formale Herleitung der Auswirkungen lokaler (fahrzeugseitiger) Interaktionsmuster auf mikroskopischer Ebene nur bis zur mesoskopischen Repräsentation als Phasenraumdichteänderungen möglich, sofern dort weiterhin kollisionsartige Paarwechselwirkungen angenommen werden. Helbing geht, wie in Gleichung 2.9 dargestellt, von einem Fahrzeugmodell aus, das die Geschwindigkeitsänderung eines Fahrzeugs $\frac{d\mathbf{v}_\alpha}{dt}$ als Summe der Eigendynamik, charakterisiert durch \mathbf{f}_α^0 , und der Interaktionsdynamik- bzw. -kraft² $\mathbf{f}_{\alpha\beta}$ modelliert werden kann.

$$\frac{d\mathbf{v}_\alpha}{dt} = \mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{r}_\alpha(t), \mathbf{v}_\alpha(t), t) + \sum_{\beta(\neq\alpha)} \mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_\alpha(t), \mathbf{v}_\alpha(t), t) \quad (2.9)$$

Dies entspricht einer Zustandsraumdarstellung nichtlinearer, verkoppelter Fahrzeugmodelle. Die Interaktionskraft $\mathbf{f}_{\alpha\beta}$ kann bei einem angestrebten automatisierten Verkehr jedoch nicht mehr bezüglich der Wechselwirkungen als kollisionsartig wie bei

²Diese Begriffe wurden so von Helbing in [63] benutzt.

Partikeln angenommen werden. Außerdem kann die Phasenraumdichteänderung infolge dieser Interaktionskräfte (auch Wechselwirkungen genannt) $\left(\frac{\partial \tilde{\rho}_a}{\partial t}\right)_{\text{WW}}$, wie sie in der mesoskopischen Modellierung nach Helbing in Gleichung 2.10 auftreten, nicht mehr als Boltzmann-artig angenommen werden, da die Interaktionen deterministisch sein werden und auch nicht bekannt ist, welche Verteilungsfunktion sich aus den deterministischen Interaktionen ergeben würde. Wie oben beschrieben, ist dies jedoch für die weitere Modellierung im Makroskopischen erforderlich, da die dort genutzten aggregierten Größen gerade unter Annahme einer Maxwell-Boltzmann-Verteilung formuliert wurden.

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}_a(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) + \nabla_{\mathbf{r}} \cdot [\mathbf{v} \tilde{\rho}_a(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)] + \nabla_{\mathbf{v}} \cdot [\mathbf{f}_a^0(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \tilde{\rho}_a(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)] = \left(\frac{\partial \tilde{\rho}_a}{\partial t}\right)_{\text{WW}} \quad (2.10)$$

Außerdem werden in [63, S. 180] für die Annäherung an eine Gauß-förmige Geschwindigkeitsverteilung zur Herleitung der fluiddynamischen Gleichungen die fahrzeugseitigen Kräfte \mathbf{f}_α^0 als unabhängig von der Geschwindigkeit angenommen. Wenn jedoch die Kräfte $\mathbf{f}_{\alpha\beta}$ das Resultat der Fahrzeug-Fahrzeug-Interaktionen sind, das heißt unter anderem durch eine Abstandsregelung induziert werden, dann kann \mathbf{f}_α^0 als Eigendynamik eines Fahrzeugs interpretiert werden, die aber in bestehenden Fahrzeugmodellen wie in [111] vornehmlich durch geschwindigkeitsabhängige Reibung bestimmt wird. Daher ist diese Annahme von Helbing im Vergleich zu bestehenden Fahrzeugmodellen nicht haltbar, bzw. hier nicht sinnvoll, da das Kollektivverhalten auf mikroskopischer Ebene realisiert wird, d.h. in Form einer geregelten Fahrzeugdynamik. Desweiteren wird bei dem in [63] zu Grunde gelegten Fahrzeugmodell allein eine kontinuierliche Dynamik modelliert. Es wird dort kein ereignisdiskretes Verhalten berücksichtigt, wie es im Straßenverkehr jedoch der Fall ist, und zwar bedingt durch Entscheidungen des Fahrers sowie einer zukünftigen Steuerung oder Regelung.

Aufgrund dieser Tatsachen ist eine formale Herleitung der makroskopischen Verkehrsdynamik nach dem beschriebenen Vorgehen auf Basis der hier angestrebten spezifischen mikroskopischen jedoch agentenbasierten und damit deterministischen Dynamik nicht möglich. Auch eine Spezifikation eines makroskopischen Verkehrsverhaltens in Form von partiellen Differenzialgleichungen (wie z. B. einer Dichte-, und einer Geschwindigkeitsgleichung) und die Herleitung einer diesbezüglichen notwendigen mikroskopischen Dynamik erscheint mittels dieses Vorgehens nicht zielführend.

Stattdessen ist es sinnvoll für die Formulierung von Zielen bezüglich der Zustandsübergänge, die Kontinuumsgleichung 2.2 unter Berücksichtigung des Cluster-Konzepts und der globalen Ziele der Homogenität und der Unfallfreiheit zu interpretieren. Hinsichtlich der stationären Zustände wurde im vorherigen Abschnitt gezeigt, dass die Homogenisierung durch das Erreichen identischer fahrzeuglokaler Zustände in Längsdistanz und Geschwindigkeit innerhalb eines Clusters erzielt wird und hiermit stationär eine bestimmte Dichte und ein bestimmter Fluss aufgeprägt werden. Betrachtet man das Ziel der Homogenität unter dem Aspekt der Zustandsübergänge und unter Berücksichtigung der Aussage von Helbing in [63, S. 142], dass „Um Unfallrisiken zu minimieren, [...] plötzliche Dichteänderungen vermieden werden [sollen]“, so bedeutet dies im Hinblick auf die Kontinuumsgleichung 2.2, dass Dichteänderungen als auch Flussänderungen vermieden bzw. minimiert werden sollen. Durch die Kontinuumsgleichung wird eine wechselseitige Beziehung zwischen zeitlicher Dichteänderung und räumlicher Flussänderung formuliert, und umgekehrt. Gleichzeitig ist der Fluss abhängig von der mittleren Geschwindigkeit und der Dichte über $Q(x,t) = k(x,t) \cdot V(x,t)$, weshalb eine zeitliche Dichteänderung einer räumlichen Dichteänderung und einer räumlichen Geschwindigkeitsänderung entspricht, gem. Gleichung 2.11.

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + V(x,t) \cdot \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} + k(x,t) \cdot \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

Auf einen Cluster bezogen ist es sinnvoll, die zeitliche Änderung in einem Koordinatensystem zu betrachten, das sich mit der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit, d. h. der Clustergeschwindigkeit fortbewegt. Dies entspricht dann der zeitlichen Änderung der betreffenden Größe „aus der Perspektive eines mitfahrenden Autofahrers“, in diesem Falle also eines Fahrzeugagenten. Für die Dichte wird diese zeitliche Änderung durch das totale Differenzial nach Gleichung 2.12 beschrieben, vgl. [63, S. 149].

$$\frac{dk(x,t)}{dt} = \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial x(t)}{\partial t} \cdot \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} \quad (2.12)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung 2.11 kann dann für die totale Zeitableitung der Dichte Gleichung 2.13 angegeben werden.

$$\frac{dk(x,t)}{dt} = -k(x,t) \cdot \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} \quad (2.13)$$

Aus der Sicht eines Fahrzeugagenten bedeutet eine zeitliche Dichteänderung eine räumliche Änderung der mittleren Geschwindigkeit. Eine Dichteänderung entspricht fahrzeuglokal nach Definition 2.6 einer Anpassung der der Längsausdehnung eines Clusters, was durch Positionsänderungen der Fahrzeuge hervorgerufen wird. Diese Positionsänderungen werden durch Interaktionen zwischen Fahrzeugen hervorgerufen und bezeichnen Längspositionsanpassung und Fahrstreifenwechsel. Durch eine Minimierung der Anzahl an Interaktionen folgt eine Verringerung der Anzahl an Positionsänderungen, was zu geringeren Dichteänderungen und damit örtlichen Geschwindigkeitsänderungen führt. Gleichzeitig ist bei der Formationsbildung eines Clusters eine Dynamik sicherzustellen, die eine hinreichend sanfte Konvergenz zur Zielformation realisiert, um abrupte Dichteänderungen gering zu halten. Dies ist durch geeignet gewählte Trajektorien der Fahrzeuge zu realisieren.

Zusammenfassung der Ziele. Abschließend sollen die formulierten Ziele für Cluster und Fahrzeugagenten in Kürze zusammengefasst werden.

- Ziele bezüglich stationärer Zustände
 - Fahren in einer Formation höchster Dichte gemäß Def. 2.6
 - Längsdistanz S zwischen den Fahrzeugen
 - * pro Fahrstreifen gem. $S = \frac{V}{Q}$ bei Vorgabe der zu fahrenden mittlerer Geschwindigkeit des Clusters V und des gewünschten Verkehrsflusses Q
 - * Sicherstellung, dass $\frac{S}{V} \geq T_{\text{rmin}}$ erfüllt ist, zur Kollisionsvermeidung
- Ziele bezüglich Zustandsänderungen
 - Minimierung der Anzahl an Interaktionen zwischen den Fahrzeugagenten
 - sanfte Konvergenz zur Zielformation mit geeigneten Trajektorien
 - inhärente Kollisionsvermeidung

2.2.2 Verhalten eines Fahrzeugagenten

Das Verhalten eines Fahrzeugagenten ist durch dessen Zustandsänderungen bestimmt, bzw. durch dessen Trajektorienverläufe in Bezug auf die anderen Fahrzeugagenten im betreffenden Cluster. Dieses Verhalten kann mit den Merkmalen *Sicherheit* und *Stabilität* charakterisiert werden.

Sicherheit

Sicherheit bezeichnet hier insbesondere die Kollisionsvermeidung, die durch entsprechende Funktionen herbeigeführt werden muss. Diese Funktionen sind durch technische Ressourcen zu realisieren, die mit entsprechend hoher Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Integrität und Genauigkeit als Eigenschaften technologischer Qualität, wie sie in [153] formuliert wurden, eine sichere Funktion ermöglichen. Gleichzeitig kann Sicherheit durch die angestrebte Homogenität des Verkehrs herbeigeführt werden, da hierdurch, wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, Dichte- und Geschwindigkeitsfluktuationen vermieden werden. Bei nicht vorhandener Homogenität aufgrund nicht vollständiger Durchdringung autonomen Fahrens, könnte der Grad der Homogenität in Form des Durchdringungsgrades autonomer Fahrzeugagenten im Straßenverkehr als zusätzliche Größe herangezogen werden, welche die Sicherheit charakterisiert. In vorliegender Arbeit wird jedoch zum Zwecke der Konzeption und des Entwurfs geeigneter Verfahren von einer vollständigen Durchdringung autonomen Fahrens ausgegangen.

Stabilität

Stabilität bezeichnet bei einem Fahrzeugagenten das im regelungstechnischen Sinne stabile und definierte Folgen einer Solltrajektorie unter Störeinflüssen sowie unter Parameteränderungen.

Bezüglich des Clusters bezeichnet Stabilität die Konvergenz zu einer Zielformation. Gleichzeitig soll diese Zielformation auch bei Störungen, wie sie z. B. durch das Kommunikationsnetzwerk auftreten können, beibehalten werden.

2.2.3 Funktion eines Fahrzeugagenten

Die Funktionen eines Fahrzeugagenten dienen der Realisierung der Ziele durch implementierte Algorithmen und durch technische Ressourcen wie dem Rechner eines Fahrzeugagenten oder der Sensorik und der Aktorik. Hinsichtlich der abstrakten Funktionen lassen sich Perzeption, Kommunikation und Handlung (Abbildung 2.2) identifizieren, die ein autonomes Fortbewegen eines Fahrzeugagenten zum Zwecke eines definiertes Verkehrsverhalten ermöglichen. Durch Perzeption und Kommunikation sind die agentenseitigen Größen, wie sie in Abschnitt 2.2.1 eingeführt wurden, als auch diejenigen anderer Fahrzeugagenten zu erfassen, aufgrund derer die Funktion

„Handlung“ die zur Ziererreichung erforderlichen Interaktionen des Fahrzeugagenten erzeugt.

Perzeption eines Fahrzeugagenten

Die Funktion der Perzeption eines Fahrzeugagenten umfasst die Subfunktionen der Ortung und der Umgebungswahrnehmung. Sie dienen sowohl der Ermittlung der Absolutposition als auch der Relativposition in Bezug auf andere Fahrzeugagenten. Die Ortung ist als fahrzeugseitige Positionserfassung in einem globalen Koordinatensystem von der Erfassung von Größen in einem fahrzeugseitigen Koordinatensystem zu unterscheiden, die unter der Bezeichnung Umgebungswahrnehmung subsumiert werden. Es folgt eine Zuordnung von Technologien, mit denen eine geeignete Positionsermittlung durchgeführt werden kann.

Ortung. Eine hochverfügbare und zuverlässige fahrzeugseitige Positionserfassung ist ein Kernelement zukünftiger kooperativer Systeme im Straßenverkehr [15]. Die geringen Kosten von GNSS (Global Navigation Satellite System)-Empfängern und die Abdeckung durch GNSS prädestiniert diese Positionserfassung gegenüber anderen Ortungstechniken, die häufig Radar, Ultraschallsensoren oder Kameras nutzen. Desweiteren bieten GNSS Satelliten den fahrzeugseitigen verteilten Steuerungs- und Regelungsmechanismen eine globale Uhr und ein gemeinsames erdbezogenes Koordinatensystem. Das erdbezogene Koordinatensystem basiert auf dem *Universal Transverse Mercator* (UTM) Bezugssystem. UTM hat ein dezimales, rechtwinkliges Raster in das die sphärischen Messungen in Grad mittels unterschiedlicher Referenzellipsoiden (z. B. das *World Geodetic System* (WGS) 84) konvertiert werden können. Daher sind die Positionen in UTM kartesisch und werden in Metern erfasst, was es ermöglicht, diese Daten direkt in physikalischen Fahrzeugmodellen zur Zustandsschätzung und Regelung zu nutzen. Diese Vorteile machen GNSS zu einer Ortungstechnik, die für kooperative Regelungen im Straßenverkehr essenziell ist.

Es existieren unterschiedliche GNSS, wie das *Global Positioning System* (GPS) der USA oder das *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya* (GLONASS) (Russland) oder das im Aufbau befindliche *Galileo* der Europäischen Union. Das grundsätzliche Funktionsprinzip ist dort stets dasselbe: Jeder Satellit sendet in regelmäßigen Zeitabständen eine Nachricht, die Uhrzeit und Orbitalinformation des Satelliten sowie eine Pseudozufallszahl (PRN) zur empfängerseitigen Positionsbestimmung

beinhaltet. Galileo wird jedoch über zusätzliche sog. *Safety Services* verfügen, die z. B. in Form eines *Integrity Flag* dem Empfänger eine Information bereitstellen soll, ob die Daten zur Positionsberechnung verwendbar sind.

Wesentliches Problem der Fahrzeugortung stellt jedoch die unzureichende Präzision der Positionserfassung mittels GNSS dar. Sie wird in der Standardliteratur wie [83] mit zehn bis 15 m angegeben. Daher werden derzeit GPS-Empfänger nur zur Navigation mittels Map-Matching-Algorithmen eingesetzt. Für den Einsatz in einem kooperativen Regelungssystem ist es jedoch notwendig, die Messgenauigkeit wesentlich zu verbessern, womit sich auch unterschiedliche Forschergruppen auseinandersetzen, siehe [52] und [110]. Für kooperative Fahrsituationen im Straßenverkehr ist laut [15] eine Genauigkeit im Subdezimeterbereich notwendig. Andere Forschergruppen betrachten als primäre Anforderung aus der Anwendungsperspektive des Straßenverkehrs die *Fahrstreifengenauigkeit* der Ortungseinheit [61].

Eine Verbesserung der Positionsgenauigkeit kann durch sog. *Differential GPS* (DGPS) erzielt werden. Hierbei handelt es sich um die Korrektur der Satellitenpositionsdaten durch Referenzstationen auf der Erdoberfläche. Diese Korrekturdaten werden an die GPS-Empfänger gesendet, z. B. über GPRS (General Packet Radio Service). Neben solchen regionalen DGPS-Korrekturdaten, die jeweils von einer einzelnen Referenzstation abgeleitet und ausgesendet werden, gibt es auch Korrekturdaten für große Gebiete, die über geostationäre Satelliten verbreitet werden (SBAS). In Europa heißt dieses satellitengestützte DGPS-System EGNOS, in Amerika WAAS und in Japan MSAS.

Die Positionsgenauigkeit verbleibt jedoch bei DGPS zumeist bei ungefähr 1 m, was dem Anspruch einer Formationsregelung, sowie anderen kooperativen Verkehrsassistenzsystemen, nicht gerecht wird. Die sog. *real-time kinematic* (RTK) basierten Ortungssysteme versprechen eine Genauigkeit im Zentimeterbereich. Bei RTK wird die Phasenlage des Trägersignals zu einem Referenzsignal ausgewertet, um mittels des Wissens der Wellenlänge des Trägersignals die Relativposition des Empfängers zur Referenz zu ermitteln. Die Genauigkeit dieser Relativposition liegt im Zentimeterbereich. Probleme können aufgrund der Vielfachheit der mathematisch möglichen Phasenzyklen entstehen, denen jedoch mittels heuristischer Algorithmen, welche die Distanzen zwischen mehreren Satelliten vergleichen, in den meisten Fällen erfolgreich begegnet werden kann. Jedoch kann diese Fehlermöglichkeit nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Während diese Verfahren allein die Ortungseinheit betrachten wird in [61] auch die Karte mit berücksichtigt. Die Genauigkeit wird dort als ein Merkmal beschrieben, das zum einen vom Streumaß der Ortungseinheit und zum anderen von der genutzten Karte herrührt. Desweiteren wird dort über ein stochastisches Modell gezeigt, dass eine Streuung von 0,5 m seitens der Karte und 0,05 m seitens der Ortungseinheit notwendig ist, um mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 90 % feststellen zu können, ob sich ein Fahrzeug auf dem betreffenden Fahrstreifen befindet.

Ein größeres Problem stellt das Erkennen von Zyklusfehlern dar, die auftreten, wenn die Sichtverbindung zum jeweiligen Satelliten verloren wird. Dies ist bei der hier verfolgten Anwendung wegen des Auftretens von Unterführungen, hohen Gebäuden und Bewaldung häufiger der Fall. Der Verlust des Satellitensignals ist ein grundsätzliches Verfügbarkeitsproblem von GNSS. Gelöst wird dies derzeit mittels modellbasierten Filterungsmethoden, die auch aus der Regelungstheorie bekannt sind. Hierbei wird eine Sensordatenfusion der satellitenseitigen Position mit einer Inertialmesseinheit (engl. *Inertial Measurement Unit* (IMU)) und anderen fahrzeugseitigen Sensoren durchgeführt. Dies ermöglicht eine Driftkompensation der IMU-Sensorik und das Überbrücken von GPS-seitigen Signalverlusten. Als Modell für diese Datenfusion wird das Fahrzeug als eine Punktmasse angenommen, die in einem dreidimensionalen Raum frei bewegt wird, wie es z. B. in [52] oder [110] beschrieben wird. Als Methoden der Datenfusion werden *Extended Kalman Filter*, *Unscented Kalman Filter*, sowie *Partikelfilter* eingesetzt.

Umgebungswahrnehmung. Die Umgebungswahrnehmung dient der detaillierten Erfassung der Umgebung. Hierzu ist zum einen die hierfür notwendige Sensorik zu zählen, zum anderen die über die reine Aufzeichnung und starre Auswertung von Sensorsignalen hinausgehende Funktion der Wahrnehmung. Diese erzeugt auf Grundlage der Sensordaten mittels hinterlegten Modellen Informationen, die zur Generierung von Entscheidungen genutzt werden können.

Desweiteren lässt sie sich in dynamische und statische Umgebungswahrnehmung untergliedern. Die dynamische Umgebungswahrnehmung betrifft die Erfassung von sich bewegenden Objekten oder Größen der Umgebung, die sich in Abhängigkeit der Zeit ändern können, wie es es Fahrzeugformationen der Fall ist. Die statische Umgebungswahrnehmung betrifft Objekte und Größen, die sich über die Zeit nicht ändern und die daher vorteilhaft in Datenbanken abgelegt werden können, wie es

durch eine digitale Karte von Navigationssystemen auch derzeit schon der Fall ist.

Neben der Ortungseinrichtung, die einer Positionsbestimmung in einem Weltkoordinatensystem dient und damit als Sensor aufgefasst werden kann, wird häufig neben einer Datenfusion mit gemessenen Zustandsgrößen des Fahrzeugs selbst, z. B. mittels einer IMU (s.o.), eine Fusion mit Größen zusätzlicher Umgebungssensorik vorgenommen, was einer einfachen Art dynamischer Umgebungswahrnehmung entspricht, weil in den dortigen Fusionsalgorithmen in einfacher Art Wissen zur „Interpretation“ der Sensordaten hinterlegt ist. Desweiteren ist es für die Trajektorienplanung notwendig, die mittels satellitenbasierter Ortung ermittelte Position mit einer Karte abzugleichen (Map-Matching), die Informationen bezüglich der Umgebung in Form von möglichen Trajektorien, wie z. B. Fahrstreifen, Auf- und Abfahrten etc., enthält (statische Umgebungswahrnehmung). Die Datenfusion nach bestimmten Modellen bzw. Filtern sowie der Abgleich mit statischen Daten aus einer Karte zur Generierung von Positionsinformationen können daher zur Wahrnehmung gezählt werden.

Somit ist die genutzte Karte an sich als ein Teil der Umgebungssensorik zu interpretieren, die zur Trajektorienplanung auf der sog. Bahnführungsebene dient. Auf untergeordneter Ebene werden Kartendaten mit Daten fahrzeugeigener Sensoren ergänzt. Letztere werten Umgebungsdaten aus, die nicht statisch in einer Karte abgelegt werden können. Hierzu gehören insbesondere Abstände zu anderen Fahrzeugen, jedoch auch Fahrstreifenbegrenzungen, da eine fahrstreifengenaue Positionsbestimmung mittels GNSS allein nicht möglich ist. Als zusätzliche Umgebungssensorik können hier insbesondere optische, funkbasierte und akustische Sensoren zählen. Neben dieser Klassifikation nach dem genutzten physikalischen Medium kann zudem noch zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden werden. Aktive Sensoren senden zu nutzende Signale aus, um diese nach Reflexion zur Informationsgewinnung weiter zu verarbeiten, während passive Sensoren allein Signale erfassen, die in der physikalischen Umwelt vorliegen. Zu den genutzten optischen Sensoren zählen Laserscanner (aktiv) genauso wie Kameras, die jedoch als passive Sensoren zu identifizieren sind. Als relevante funkbasierte Technik können Radarsensoren aufgefasst werden, die reflektierte Radarstrahlung auswerten. Ultraschallsensoren basieren hingegen auf hochfrequenten Schallsignalen, die zur Distanzmessung eingesetzt werden. In der Praxis heutiger Fahrerassistenzsysteme, wie der automatischen Abstandshaltung, werden insbesondere Nah- und Fernbereichsradsensoren eingesetzt [10]. Zur detaillierten Erfassung der Umgebung mit dem Zweck der Identifikation von Ob-

jekten, was zur Funktionalität der Wahrnehmung gehört, wird in der Praxis, z. B. bei Wettbewerben wie der *Grand Urban Challenge*, häufig auf Laserscanner zurückgegriffen. Diese Sensoren unterliegen, abhängig vom physikalischen Prinzip, jedoch unterschiedlichen Witterungsbedingungen, wie z. B. Nebel oder Schnee, weshalb es für einen automatischen Verkehr notwendig ist, diese einzelnen Sensordaten ebenfalls mit geeigneten Methoden zu fusionieren. Zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit und insbesondere der Verfügbarkeit existieren neuere Ansätze, die Umgebungssensorik mit satellitenbasierter Ortung zu verknüpfen, um kartenbasiert eine genauere Positionsbestimmung zu ermöglichen. Hierzu werden, wie in [121] beschrieben, einzelne Landmarken definiert und in ein digitales Geländemodell eingepflegt, die mit einem Laserscanner fahrzeugseitig erfasst werden.

Daher dienen die technischen Systeme für die Umgebungssensorik vornehmlich zwei Funktionen: der Erfassung von Objekten zur Ermittlung der Relativdistanz und -geschwindigkeit seitens des Ego-Fahrzeugs sowie auch der Positionsbestimmung im Zusammenhang mit den Technologien, die unter der Ortung zusammengefasst worden sind. Als offene Fragestellung zu den genannten Technologien verbleibt jedoch die Sicherstellung bestimmter Eigenschaften und Merkmale, die für eine Anwendung in einem kooperativen, vollautomatischen Straßenverkehr unbedingt erforderlich ist.

Bewertung der Ortung und Umgebungssensorik. Bei den beschriebenen Verfahren zur Ortung ist zu bemerken, dass zwar stets z. B. in Datenblättern von Ortungssystemen Genauigkeits- oder Verfügbarkeitsangaben gemacht werden, aber in diesen nicht ausgeführt wird, wie diese Angaben, d. h. unter Zuhilfenahme welcher Referenz und mit welchem Vorgehen diese ermittelt wurden. Zukünftige satellitenbasierte Ortungssysteme wie Galileo sollen Mehrwertdienste anbieten, die gewisse Grenzwerte für Größen garantiert einhalten sollen, wie z. B. Anforderungen an die Genauigkeit und an die Verfügbarkeit. Die Einhaltung dieser Größen ist für einen automatischen Straßenverkehr von hoher Wichtigkeit. Die Notwendigkeit eines an Normen orientierten Nachweises zur Einhaltung dieser produzentenseitigen Zusicherungen wurde bereits in unterschiedlichen Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik festgestellt, vgl. [71] oder [153]. Es ist von hoher Wichtigkeit, dass diese Nachweisführung der Funktionalität des Ortungssystems unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen des Anwendungsfalles, hier des Straßenverkehrs, durchgeführt wird. Für einen solchen Nachweis wurde in

[153] der Begriff der technologischen Qualität eines Ortungssystems als Grundlage der Verifikation dieser Eigenschaften eingeführt. Eine solche Nachweisführung muss alle Teilkomponenten umfassen, die der Positionsbestimmung der Fahrzeuge bzw. hier Fahrzeugagenten dienen. Hierzu zählt die satellitenbasierte Ortungseinheit inklusive der Fusion mit einer Inertialmessplattform oder zusätzlicher Umfeldsensorik unter Zuhilfenahme weiterer Filteralgorithmen. In diesem Sinne kann es als weiterführende Forschungsarbeit aufgefasst werden, den in [153] eingeführten technologischen Qualitätsbegriff auf die Umfeldsensorik und die damit verbundene Umgebungswahrnehmung zu erweitern, um eine integrierte Bewertung der Perzeption im Rahmen einer Nachweisführung zu ermöglichen.

Kommunikation eines Fahrzeugagenten

Grundsätzlich lässt sich als Kommunikation zwischen Fahrzeugagenten jeglicher Datenaustausch bezeichnen, ohne diesen auf die Nutzung einer bestimmten Technik festzulegen. Somit sind das Erfassen von Objekten, wie es durch die Funktion der Perzeption ermöglicht wird, und die Wahrnehmung der kausalen Reaktionen des betreffenden Fahrzeugagenten seitens der anderen Teilnehmer durchaus als Form der Kommunikation anzusehen. Jedoch ist diese Art der auf gegenseitiger optischer Wahrnehmung basierenden Kommunikation nur eingeschränkt nutzbar, da das gezielte Senden und Empfangen von abstrakten Datentypen nicht ermöglicht wird. Zudem ist eine Sichtverbindung zwischen den Teilnehmern Voraussetzung für diese Art der Kommunikation. Drahtlose Funkkommunikation hingegen ermöglicht den Fahrzeugagenten ihre Position und weitere abstrakte Informationen, die frei definiert werden können, mit benachbarten Fahrzeugagenten und Infrastruktureinrichtungen auszutauschen. Für sicherheitsrelevante Anwendungen ist es jedoch notwendig, dass die genutzte Funktechnik über eine hohe Bandbreite verfügt und geringe Latenzzeiten sowie geringen Datenverlust sicherstellt. Grundsätzliche Vorteile der Funktechnik liegen darin, dass keine Sichtverbindung zu anderen Fahrzeugagenten erforderlich ist, dass der Datenaustausch omnidirektional erfolgen kann und dass die Reichweite in der Regel mehr als 150 m im Freien beträgt. Nachteile drahtloser Funkkommunikation sind die Notwendigkeit der sicheren Verschlüsselung bestimmter Datenpakete, das Auftreten nicht deterministischer Latenzzeiten und Datenverluste, sowie Bandbreitenbegrenzungen. Ebenfalls ist die erforderliche Penetrationsrate von funkbasierten Kommunikationseinrichtungen in einem zukünftigen Straßenverkehr

zu berücksichtigen. Es erscheint notwendig, eine Art der Kommunikation basierend auf Mitteln der Perzeption zu implementieren, damit ein Informationsaustausch mit älteren Fahrzeugen, die nicht über Funkschnittstellen verfügen, ermöglicht wird.

Die Funktion der Kommunikation eines Fahrzeugagenten lässt sich, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, mittels des genutzten *Kommunikationsmittels* und des *Kommunikationsprotokolls* beschreiben, was im Folgenden ausgeführt wird.

Kommunikationsmittel. Bezüglich der Reservierung geeigneter Frequenzen für die Fahrzeug-Fahrzeug- und die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation im Straßenverkehr, die unter der Bezeichnung *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC) zusammengefasst werden, sind in den letzten Jahren wesentliche Vorarbeiten seitens führender Gremien aus Forschung und Entwicklung sowie Politik geleistet worden [15]. In den USA wies die *Federal Communications Commission* (FCC) im Jahr 1999 ein 75 MHz-Band innerhalb des 5,9 GHz Bereichs der Funktion von DSRC zu. Dieses Band wird im nationalen Forschungsprogramm des *US Department of Transportation* für intelligente Transportsysteme und in ähnlichen Forschungsprogrammen in Canada und Mexiko genutzt. Im Jahr 2003 legte die FCC die Lizenzregeln und Dienstregularien für DSRC zwischen 5850 MHz und 5925 MHz fest. Entsprechendes wurde im Jahr 2008 seitens des *Electronic Communications Committee* innerhalb des *European Radio Communication Office* der Europäischen Union vorgenommen, sodass – harmonisiert zur FCC-Allokation – 5875 MHz bis 5925 MHz für DSRC im Straßenverkehr zugewiesen wurden. In Japan wird derzeit ein 5,9 GHz Band für DSRC eingesetzt, wobei dies allein zur elektronischen Mauterhebung genutzt wird. Für Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation soll statt eines Bandes im 5,9 GHz Bereich ein 10 MHz Frequenzband im 700 MHz-Bereich zum Einsatz kommen [109]. Ein Vorteil läge hier in der geringeren Frequenz, die von Objekten weniger gedämpft wird, sodass eine höhere Reichweite erzielt werden kann. Fraglich ist, ob hier eine ähnliche Baudrate zur Datenübertragung erzielt werden kann, wie bei den genutzten Frequenzbändern der USA und Europas. In den USA wurden, im Gegensatz zu Japan, im Jahr 2009 zusätzlich alte UHF-Frequenzbänder für neue DSRC Anwendungen bereit gestellt. So soll z. B. die elektronische Mauterhebung in den USA über das Band zwischen 902 und 928 MHz ermöglicht werden, wogegen für diesen Dienst in Europa das Band zwischen 5795 und 5815 MHz belegt werden soll.

Kommunikationsprotokoll. Auch zur Entwicklung geeigneter Kommunikationsprotokolle wurden in Normungsgremien Vorarbeiten geleistet. In den USA ist die Entwicklung der Protokollschichten von DSRC in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Im Jahr 2008 wurde der Standard IEEE 802.11 p veröffentlicht, welcher die physikalische Schicht (Bitübertragungsschicht) und ein Teil der Sicherungssicht, die *Media Access Control* Schicht, spezifiziert. In der Familie der IEEE 1609 Standards [79], welche derzeit in Erprobung sind, werden Ressourcenmanagement, Sicherheitsdienste, Netzwerkdienste und Mehrkanalbetrieb spezifiziert. Sicherheit und Datenschutz sind zwei weitere wichtige Merkmale, die sehr rege diskutiert werden. So werden im IEEE 1609.2 Standard Authentifizierungsmechanismen über einen öffentlichen Schlüssel definiert. Jedoch erzeugt dies einen Overhead von 64 Byte bei einer Länge des Datenframes von nur 25 Byte, was die Frage aufkommen lässt, ob dieses Missverhältnis nicht durch alternative Ansätze verbessert werden kann. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Nutzung der GPS-Zeit zur Erstellung von Identifizierungsschlüsseln während der Nutzung, die jeweils nur für einen begrenzten Zeitraum gültig sind [67]. Auf der Anwendungsebene für DSRC wurde bei der *Society of Automotive Engineers* (SAE) ein Nachrichtenverzeichnis für DSRC entworfen [37, 119].

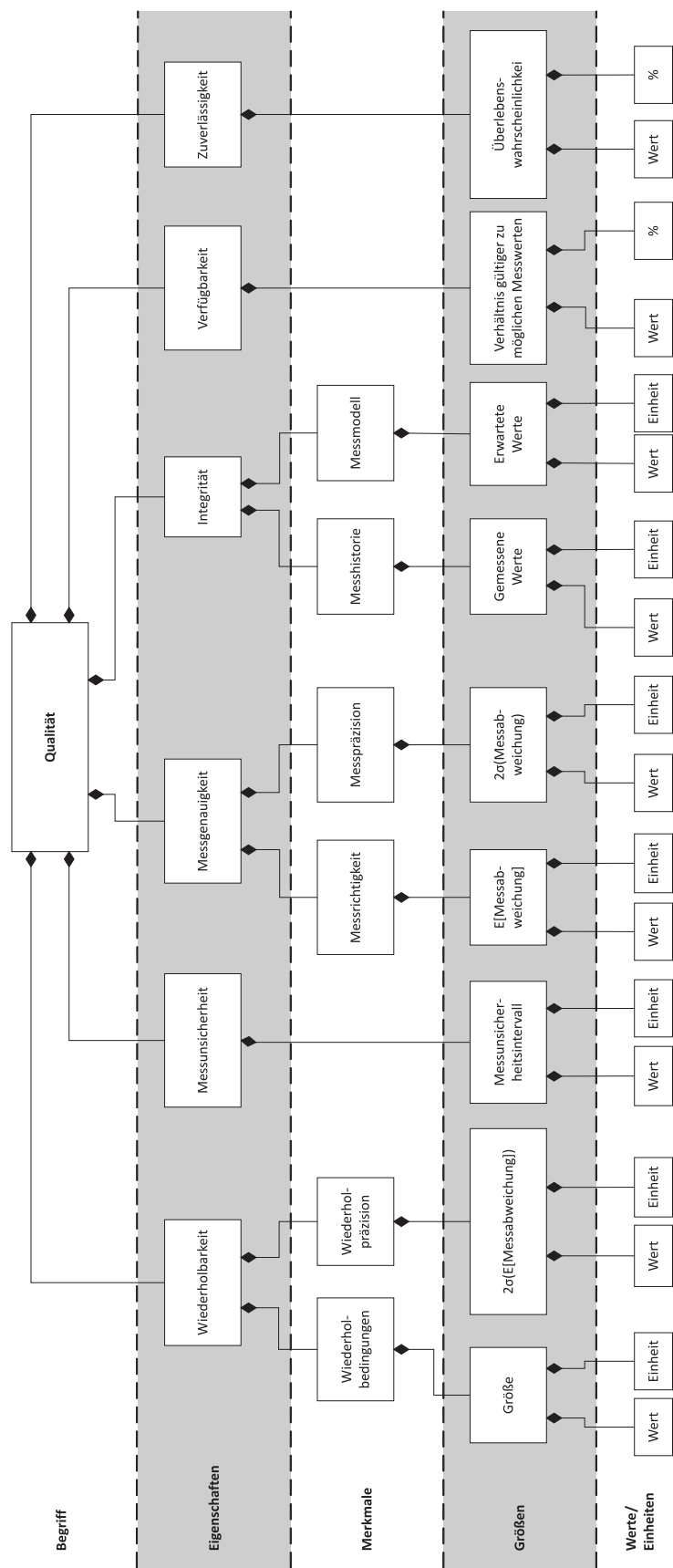
Bewertung der Kommunikation. Genau wie die Perzeption eines Fahrzeugagenten ist auch dessen Kommunikationssystem bei einer zukünftigen sicherheitsgerichteten Entwicklung und für eine sichere Nutzung in einem kooperativen automatisierten Verkehr hinsichtlich der Qualität zu beurteilen. Die typischen Eigenschaften der Kommunikation finden sich z. B. in [94]. Jedoch ist es prinzipiell auch möglich, das in [153] eingeführte Schema zur Beurteilung der Qualität heranzuziehen, vgl. Abbildung 2.5. Ein Vorteil liegt darin, dass dann die Qualität von Technologien mit einem einheitlichen Schema verglichen werden kann. Hierfür sind die Eigenschaften von dem messtechnischen Einsatz aus [153] auf einen allgemeineren technologischen Einsatz konzeptionell zu übertragen. Daher werden diese wie folgt umbenannt. Die verallgemeinerte technologische Qualität kann als Eigenschaftstupel, bestehend aus *Wiederholbarkeit*, *Unsicherheit*, *Genauigkeit*, *Integrität*, *Zuverlässigkeit* und *Verfügbarkeit*, aufgefasst werden. Diese der Messtechnik und technischen Zuverlässigkeit entlehnten Begriffe müssen dem technologischen Anwendungsbezug entsprechend interpretiert werden, was einer entsprechenden Dekomposition in Merkmale sowie zugehörigen Größen und Einheiten entspricht. Zum Teil kann die Benennung der

Eigenschaften der Qualität bezogen auf die jeweilige Technologie unpassend wirken, sodass dies durchaus noch als weiterer Forschungsbedarf an terminologischer Präzisierung aufgefasst werden kann.

Beginnend bei der Eigenschaft *Wiederholbarkeit* sind analog zur Ortung die Merkmale Wiederholbedingungen und Wiederholpräzision abzuleiten. Unter Wiederholbedingungen sind alle Bedingungen zu verstehen, die von der Umgebung oder Witterung hervorgerufen werden und aufgrund dessen den Datenaustausch zwischen Fahrzeugagenten beeinflussen. Die Berücksichtigung von Witterungsbedingungen erhält im kooperativen Straßenverkehr, im Gegensatz zu bisher typischen – nicht sicherheitsrelevanten – Einsatzszenarien von Kommunikationstechnik, eine besondere Wichtigkeit, und zwar aufgrund der Vielfältigkeit der auftretenden Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit, welche die Eigenschaften des Kommunikationskanals beeinflussen können. Als Wiederholpräzision kann nun die Streuung der Größen Datenrate, Anzahl der Übertragungsfehler, Reichweite und Latenzzeit in Abhängigkeit wiederholender Umgebungsbedingungen aufgefasst werden. Eine hohe Wiederholpräzision würde in diesem Sinne das wiederholte Erreichen von definierten Größen bei gleichen Umgebungsbedingungen bedeuten, was die Auslegung von Regelungssystemen für einen kooperativen Straßenverkehr vereinfacht, da hierbei direkt beispielsweise Korrelationen von Umgebungsparametern wie Temperatur und Feuchtigkeit, die messtechnisch online erfasst werden, zur Adaption von Regelungsparametern genutzt werden können. Dies wäre bei geringer Wiederholpräzision nur mit erhöhtem technischen Aufwand möglich.

Die Eigenschaft der *Unsicherheit* des Kommunikationssystems eines Fahrzeugagenten repräsentiert im Gegensatz zur Wiederholbarkeit und Genauigkeit theoretische Merkmale, die inhärent durch die Konzeption und Konstruktion des Systems gegeben sind und mittels Unsicherheitsintervallen charakterisiert werden. Größen, die unter diesem Aspekt beurteilt werden können, sind unter anderem die theoretische Bandbreite in Abhängigkeit von der Distanz, der Anzahl der Teilnehmer und – insbesondere für den Anwendungsfall in dieser Arbeit relevant – der theoretisch maximalen Relativgeschwindigkeit zwischen den Teilnehmern. Ähnliche Abhängigkeiten sind für die Größen Fehlerrate und Reichweite zu berücksichtigen.

Die *Genauigkeit* lässt sich bei der Kommunikation wie in [153] in die Merkmale Präzision und Richtigkeit dekomponieren. Präzision lässt sich durch ein Streumaß repräsentieren, Richtigkeit durch einen Erwartungswert. Beide Maße beschreiben



hier die durch Versuche tatsächlich erreichten Werte anhand der bereits bei der Unsicherheit genannten Größen und deren Abweichungen zu den dort ermittelten theoretischen Werten. Zur Quantifizierung ist das Streumaß der Präzision heranzuziehen; der Erwartungswert der Richtigkeit liefert eine Aussage über einen systematischen Fehler zum jeweils theoretisch erzielten Wert (Bias).

Integrität als Eigenschaft der Qualität der Kommunikation eines Fahrzeugagenten ist grundsätzlich zwar ähnlich zu interpretieren wie bei der Ortung in [153]. Dort bezeichnet sie die „Sinnhaftigkeit“ einer Messung, hier ist letzterer Begriff durch den Datenaustausch und die konsekutive Interpretation der Daten seitens der Fahrzeugagenten zu ersetzen. Bei der Ortung wurde die Integrität durch die Abweichung zwischen Versuchsdaten und Modelldaten beurteilt. Dies ist bei der Kommunikation anders zu interpretieren. Zum einen kann die Integrität einer gesendeten Nachricht selbst beurteilt werden, was insbesondere den Aufbau der Nachricht betrifft und grundsätzlich über die Verwendbarkeit der Nachricht entscheidet. Dies kann zudem noch in die einzelnen Datensegmente heruntergebrochen werden, ob diese jeweils der Protokollspezifikation hinsichtlich Länge, Codierung etc. genügen. Ist dies erfüllt, lassen sich die Daten zu Informationen decodieren. Zum anderen sind diese empfangenen Informationen hinsichtlich ihrer Integrität zu beurteilen, was einer Überprüfung auf Plausibilität durch den Vergleich mit anderen oder ähnlichen Daten aus anderen Quellen, wie z. B. Sensoren, entspricht. Dieser Vergleich kann auch mittels Sensordatenfusion vorgenommen werden, was letztlich wiederum eine modellbasierte Schätzung von Größen darstellt.

Die *Verfügbarkeit* kann als reziprok zur Abweichung der erzielten zu den spezifizierten Sende- bzw. Empfangsraten (Sende- u. Empfangszykluszeiten) aufgrund von Übertragungsfehlern aufgefasst werden, die in der Regel ein erneutes Senden von Nachrichten erfordern. Durch das wiederholte Senden von Nachrichten wird die effektive Sende- bzw. Empfangsfrequenz gesenkt. Die Übertragungsfehler können hierbei durch das Nichtvorhandensein von Teilnehmern oder den Datenkanal störende Umgebungsbedingungen verursacht werden.

Die *Zuverlässigkeit* ist bei der Kommunikation analog zur Perzeption als Überlebenswahrscheinlichkeit aufzufassen. Sie bezeichnet die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Kommunikationssystem eines Fahrzeugagenten für einen definierten Zeitraum nicht ausfällt.

Durch die Schaffung der Standards für Car2Car-Kommunikation existieren bereits

Anforderungen an die Qualität eines solchen Kommunikationssystems bis zur Anwendungsschicht des Kommunikationsprotokolls. Bezüglich der im Straßenverkehr auftretenden Anwendungen wurden Anforderungen an den Datenaustausch spezifiziert wie z.B. in [15]. Nach dem eingeführten Schema zur Bewertung der Kommunikation eines Fahrzeugagenten entsprechen diese einer geforderten Unsicherheit. So wird dort zum Beispiel für den Fall der Kollisionsvermeidung in Längsrichtung („Forward Collision“) eine Zyklusfrequenz der zu sendenden Nachrichten von 10 Hz angegeben. Die maximal zulässige Verzögerung wird mit 100 ms angegeben, während die minimale Reichweite für diesen Anwendungsfall bei 150 m liegen soll.

Handlungsanweisungen und Handlung eines Fahrzeugagenten

Unter den *Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten* werden die fahrzeugagentenlokalen Entscheidungs- und Regelungsalgorithmen zusammengefasst, die dazu dienen, Handlungsanweisungen in Form von Entscheidungen bzw. Sollgrößen zu generieren. Die Umsetzung der Anweisungen bzw. der Sollgrößen durch den Fahrzeugagenten soll dazu führen, die Ziele unter Ausnutzung der Perzeption und Berücksichtigung der Attribute seitens eines Fahrzeugagenten zu erreichen. Dies erfolgt mittels Stellgliedern und Aktorik und lässt sich in der Funktion *Handlung* zusammenfassen. Jedoch werden geeignete Stellglieder und die Aktorik im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, sondern als existent angesehen, indem davon ausgegangen wird, dass die Handlungsanweisungen, d. h. die Entscheidungen und die jeweiligen Sollgrößen exakt umgesetzt werden.

Notwendige Voraussetzung für die Generierung von Handlungsanweisungen seitens eines Fahrzeugagenten ist die Implementierung fahrzeugseitiger Regelungen für die Quer- und Längsdynamik. Regelungen der Querdynamik sollen sicherstellen, dass der Fahrstreifen fahrzeugseitig hinreichend gehalten wird, sowie einer Krümmung definiert gefolgt werden kann. Regelungen der Längsdynamik dienen dazu, die Distanz zum voraus fahrenden Fahrzeug einzuhalten und eine definierte Geschwindigkeit einzuregeln. Hierbei sind die integrierten Regelungskonzepte, die auf einem Reglerentwurfsmodell basieren, das die Quer- und integrierte Längsdynamik berücksichtigt, von denjenigen zu unterscheiden, die getrennte Reglerentwürfe für die Querdynamik und für die Längsdynamik aufweisen. Bei allen Verfahren ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese eine Robustheit gegenüber den in der Praxis auftretenden parametrischen und strukturierten Unsicherheiten aufweisen müssen.

Eine Definition von Robustheit findet sich unter anderem in [164]. Eine aktuelle Übersicht zu den einzelnen Regelungsverfahren für Längs-, Quer-, sowie integrierte Längs- und Querdynamik findet sich in [38, S. 20 ff.]. Untersuchungen haben gezeigt, dass *Gleitflächenregler*, engl. *Sliding Mode Control* (SMC), für die Regelung der Quer- und Längsdynamik von Fahrzeugen besonders geeignet sind. So wurde in [38] eine integrierte Quer- und Längsdynamikregelung auf Basis eines Gleitflächenreglers entworfen, wobei ein lineares Zustandsraummodell für den Entwurf herangezogen wurde. Untersuchungen zur Querdynamikregelung mittels SMC wurden ebenfalls am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik durchgeführt [73, 77]. Um die Leistungsfähigkeit dieses Regelungsverfahrens zu zeigen, wurde es dort auf das Modell eines Zugfahrzeug- und Anhänger-Gespanns angewendet. Zum einen wurde ein nichtlineares Zweispurmodell inklusive Wankdynamik erstellt, das für den Test des Reglers herangezogen wurde. Zum anderen wurde ein lineares Einspurmodell entworfen, das als Reglerentwurfsmodell herangezogen wurde. Hierdurch wurde also gezielt eine strukturelle Unsicherheit im Test des gefundenen Reglers am Zweispurmodell erzeugt. Zusätzlich wurde bei Simulationen das Gespann mit Seitenwind als Störgröße beaufschlagt und die Beladung des Gespanns sowie dessen Geschwindigkeit variiert. Es konnte durch Simulationen gezeigt werden, dass auch für äußerst ungünstige Fälle der Beladung und des Seitenwindes das Gespann hinsichtlich auftretender Pendelschwingungen stabilisiert werden kann und Querabweichungen ausgeglichen werden.

Untersuchungen wie in [10, 38, 73] zeigen, dass SMC grundsätzlich für eine fahrzeuglokale Regelung mit der Aufgabe der Trajektorienverfolgung geeignet ist, sofern die fahrzeugeigene Position sowie der Krümmungsverlauf z. B. anhand einer Karte bekannt sind. Offenbar wird die Fahrzeugdynamik auch unter widrigen Umständen stabilisiert, wodurch die Verkehrssicherheit gesteigert wird und Unfälle vermieden werden.

Eine weitere Problemstellung offenbart sich jedoch, wenn Kolonnen oder Formationen mehrerer Fahrzeuge betrachtet werden. Für diese Betrachtungen der folgenden Abschnitte wird zunächst ein lineares Zustandsraummodell für die Einzelfahrzeugdynamik angenommen (Gleichung 2.14). Auf die Ausgangsgleichung wird zunächst verzichtet, da sie für die folgende Betrachtung nicht relevant ist.

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{u}_i \quad (2.14)$$

Es wird nun für das Reglergesetz der jeweiligen Stellgröße \mathbf{u}_{i+n} bei den Fahrzeugen $n = 1 \dots p$ angenommen, dass es sich jeweils um einen Zustandsregler handelt, der proportional zur Zustandsdifferenz $x_i - x_{i+1}$ ist und über einen Vorfilter \mathbf{F} verfügt, vgl. Gleichung 2.15. Die Solldistanzen zum vorausfahrenden Fahrzeug werden in $\Delta \mathbf{x}_d$ zusammengefasst. Hiermit lässt sich das so verkoppelte System der einzelnen geregelten Fahrzeuge wie folgt modellieren.

$$\mathbf{u}_{i+n} = \mathbf{K}_{i+n+1} \cdot (\mathbf{x}_{i+n} - \mathbf{x}_{i+n+1}) + \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{x}_d \quad (2.15)$$

Das verkoppelte System kann durch Einführung eines neuen Zustandsvektors $\boldsymbol{\xi}$ und die hierzu korrespondierende Zustandsraumdarstellung mittels

$$\boldsymbol{\xi} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p]^T \text{ und} \quad (2.16)$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\Xi} \cdot \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\Upsilon} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \Delta \mathbf{x}_d \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

beschrieben werden. Die Ausdrücke für die resultierende Dynamikmatrix $\boldsymbol{\Xi}$ sowie Eingangsmatrix $\boldsymbol{\Upsilon}$ lauten entsprechend

$$\boldsymbol{\Xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_{i+1} & \mathbf{A}_{i+1} - \mathbf{B}_{i+1}\mathbf{K}_{i+1} & \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_{i+2} & \mathbf{A}_{i+2} - \mathbf{B}_{i+2}\mathbf{K}_{i+2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{B}_{i+p-1} & \mathbf{A}_{i+p-1} - \mathbf{B}_{i+p-1}\mathbf{K}_{i+p-1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

sowie

$$\boldsymbol{\Upsilon} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Die Dynamikmatrix $\boldsymbol{\Xi}$ ist offensichtlich eine untere Blockdreiecksmatrix. Die Eigen-

werte λ_i dieser Matrix ergeben sich aus der Lösung von

$$\begin{aligned} \det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{\Xi}) &= \det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}_i) \cdot \det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}_{i+1} + \mathbf{B}_{i+1} \cdot \mathbf{K}_{i+1}) \cdots \\ &\cdots \det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}_{i+p} + \mathbf{B}_{i+p}) = 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

mit der hinsichtlich der Dimensionen passenden Einheitsmatrix \mathbf{I} .

Das gekoppelte System ist genau dann im systemtheoretischen Sinne stabil, wenn alle Eigenwerte von $\mathbf{\Xi}$ einen Realteil kleiner null aufweisen. Laut Gleichung 2.20 ist das genau dann der Fall, wenn auch alle Eigenwerte der Teilsysteme auf der Hauptdiagonalen von $\mathbf{\Xi}$ einen Realteil kleiner null besitzen. Die Regler müssen also hierfür genau so ausgelegt sein, dass jedes Teilsystem stabil ist.

Dies ist jedoch kein hinreichendes Kriterium für das sichere Fahren in einem Konvoi oder in einer Formation. Denn die Vorgabe der Eigenwerte im oberen Sinne erzielt allein noch nicht, dass der Abstandsfehler stets zwischen zwei Fahrzeugen von Fahrzeug zu Fahrzeug abnimmt. Diese Forderung nennt sich *String Stability* und wurde in der Vergangenheit zur Auslegung von Reglern für Fahrzeugkonvois genutzt [143]. Laut Murray [99, S. 574] kann die Definition von *String Stability* auch auf unterschiedliche Topologien erweitert werden, die von einer reinen kettenartigen bzw. kolumnenartigen Verkopplung abweichen. Außerdem können *String Instabilities* verhindert werden, indem global übertragene Informationen genutzt werden, um fahrzeugseitig Störungen frühzeitig zu kompensieren. Bei dieser Betrachtung ist jedoch zu berücksichtigen, dass hier durch das Protokoll eine bestimmte Topologie des Datenaustauschs induziert wird. Dadurch, dass sich beim Verkehr auf Autobahnen und bei Nutzung von Ad-Hoc-Netzwerken die tatsächliche Netzwerktopologie in Abhängigkeit der Fahrzeugrelativpositionen ändert, ist die Anwendung der Definition von *String Stability* nur beschwerlich möglich. Als Alternative hierzu bieten sich kooperative Regelungen wie z. B. Konsens-Algorithmen an, wie sie z. B. in [105] vorgestellt werden. Sie sorgen für die Konvergenz der Zustandsgrößen und das Ausregeln von Störungen auch bei sich zeitlich verändernder Netzwerktopologie und Latenzzeiten, sofern die Kommunikation bidirektional erfolgt, wovon hier ausgegangen werden soll [118].

Ereignisdiskrete Entscheidungsmechanismen werden jedoch nicht in diesen Verfahren für kooperative Regelungen mit berücksichtigt. Sie definieren über Regeln, die in einer Regelbasis abgelegt werden, unter welchen Umgebungsbedingungen bestimmte Manöver durchzuführen sind. Eine Kombination von den Stärken einer ko-

operativen Regelung, die Formationsstabilität sicherstellt und kohärente Absprachen durch Konvergenz von Informationsvariablen zu identischen Endzuständen ermöglicht, mit einer deterministischen Regelbasis erscheint sinnvoll. Dies kann insbesondere durch die Rahmenbedingungen des Straßenverkehrs in Form von begrenzten und diskreten Fahrstreifen begründet werden. Ein Vorschlag hierzu wurde in [72] gemacht und ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Jedes Fahrzeug, hier dargestellt als Fahrzeuge $i - 1$ bis $i + 1$, ist über ein Kommunikationsnetzwerk in der Lage, die notwendigen Informationsvariablen auszutauschen. Das Konzept ist exemplarisch für ein Fahrzeug im i -ten Block detailliert dargestellt. Die vom i -ten Fahrzeug empfangenen Informationsvariablen, wie z. B. Geschwindigkeiten und Relativpositionen, werden zunächst einer geeigneten kooperativen Regelung zugeführt, die hieraus lokale Informationsvariable generiert. Diese werden gleichzeitig in das Kommunikationsnetzwerk zurückgespeist, sodass dies als Regelung der fahrzeuglokalen Informationsvariablen über ein Netzwerk bezeichnet werden kann. Diese lokalen Informationsvariablen werden nun weiterverwendet, indem sie einer fahrzeuglokalen Regelbasis zugeführt werden. In dieser sind ereignisdiskrete Entscheidungsmechanismen codiert, sodass auf Grundlage der vorliegenden lokalen Informationsvariablen und der fahrzeugseitigen Zustandsvariablen bzw. Regelgrößen entsprechende Handlungsentscheidungen getroffen werden können. Diese werden durch eine Menge an konsekutiv auszuführenden nicht weiter dekomponierbaren Interaktionen ausgedrückt, wie es bei Aufholmanövern und Fahrstreifenwechseln der Fall ist. Diese Menge kann nun einer Trajektoriengenerierung zugeführt werden, die einen gewünschten Verlauf von Längs- und Querpositionen in Abhängigkeit der Zeit für die unterlagerten fahrzeugseitigen Längs- und Querregelungssysteme generiert. Somit handelt es sich hierbei um ein Implementierungskonzept.

Es stellen sich zur Realisierung der Funktion zur Generierung der *Handlungsanweisungen* eines Fahrzeugagenten nun die folgenden Fragen:

1. Mit welchem Verfahren können ereignisdiskrete Entscheidungsmechanismen hergeleitet werden?
2. Welches Verfahren aus dem Gebiet der kooperativen Regelungen kommt in Frage, um eine gleichzeitige Formationsregelung zu realisieren, und zwar unter Berücksichtigung von Eigenschaften des Kommunikationsnetzwerks, wie der Latenz des Datenaustauschs und einer variablen Netzwerktopologie?

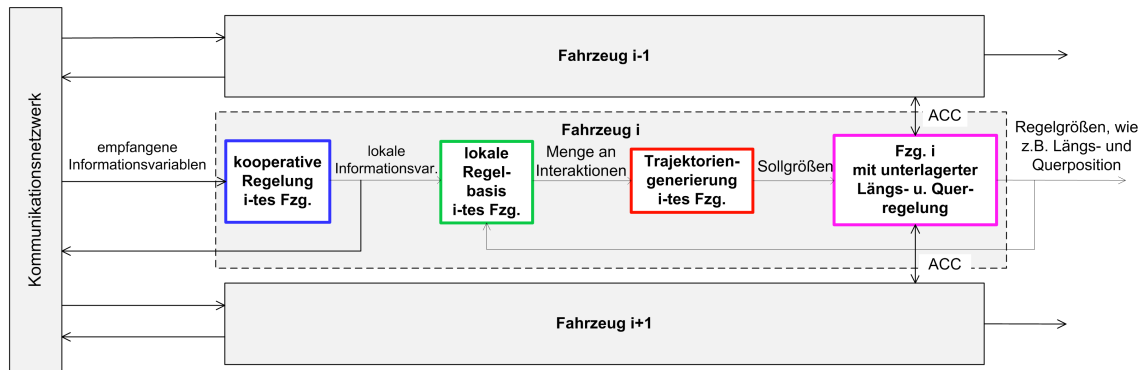


Abbildung 2.6: Implementierungskonzept Konsensus mit diskreten Entscheidungsmechanismen als Verallgemeinerung von [72]

Diese Fragen werden in dem sich anschließenden Kapitel zum Stand der Forschung aufgegriffen, so dass nach einer Bestandsaufnahme über die existierenden Verfahren eine Auswahl vorgenommen werden kann, die in den folgenden Kapiteln ausgearbeitet wird.

2.3 Fazit zur Konzeption eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Fahrzeugagenten

Die Konzeption eines zukünftigen kooperativen Straßenverkehrs als ein Multiagentensystem basiert auf dem Begriff eines Fahrzeugagenten. Dieser wurde als technisches System aufgefasst und hinsichtlich seiner Eigenschaften und Merkmale dekomponiert. Die Perzeption und die Kommunikation ermöglichen der Funktion der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten, Entscheidungen in Verkehrssituationen zu fällen und kooperativ Formationen anhand der formulierten Agentenziele einzuregeln. Koordinierte Interaktionen zwischen Fahrzeugagenten erlauben es, dass Kollektive von Fahrzeugen globale Zustandsgrößen des Straßenverkehrs gezielt beeinflussen, was zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses führt. Auf fahrzeuglokaler Ebene ermöglichen solche kollektiven Entscheidungsprozesse Unfallvermeidungsstrategien, die global positive Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit haben. Mittels einer solchen Verbesserung von Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss lassen sich insgesamt positive ökonomische und ökologische Auswirkungen erzielen. Diese sind für Unternehmen und auch Einzelpersonen direkt erfahrbar, wenn z. B. Staus vermie-

den und somit Reisezeiten verkürzt werden. Gesellschaftlich spiegeln sie sich z. B. in geringerer finanzieller Belastung der Krankenkassen und verringertem Schadstoffausstoß wider. Das sich anschließende Kapitel 3 widmet sich nach der Einordnung von Forschungsprojekten zur Verkehrsbeeinflussung und den Verfahren zu kooperativen Regelungen sowie zur Entscheidungsfindung der Auswahl von Beschreibungsmitteln in Abschnitt 3.4, um die aufgezeigten Fragestellungen zur Funktion der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten zu beantworten und damit zielgerichtete Koordinationen zwischen Fahrzeugagenten zu realisieren. Hierzu soll für den weiteren Verlauf der Arbeit von ideal realisierter Perzeption und Kommunikation eines Fahrzeugagenten ausgegangen werden.

Es muß das Ziel der
wissenschaftlichen Bestrebungen
sein, den Geist so zu lenken, daß er
über alle sich ihm darbietenden
Gegenstände begründete und wahre
Urteile fällt.

René Descartes

Kapitel 3

Stand der Forschung

Der Stand der Forschung bezüglich eines kooperativen Straßenverkehrs lässt sich in zwei aufeinander aufbauende Themenbereiche einteilen. Zum einen lässt sich der Bereich der primär anwendungsspezifischen Forschung mit dem Ziel der Verbesserung des Straßenverkehrs mittels Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation identifizieren, die vornehmlich unter dem Primat technologischer Innovation angegangen wird. Zum anderen kann aufgrund des in Kapitel 2 vorgestellten Konzepts der Fahrzeugagenten der Bereich der methodenspezifischen Forschung zur Untersuchung von kommunikationstechnisch vernetzten Multiagentensystemen (MAS) mit beschränkten Ressourcen und deren Modellierung, Regelung, Analyse und Simulation eingegrenzt werden. Hier soll die Synthese wissenschaftlicher methodischer Fundierung und anwendungsspezifischer Charakteristika im Zentrum der Betrachtung stehen, um die Fragestellungen, die sich aus den Darstellungen zur Funktion der Generierung von Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten ergeben, beantworten zu können. Hierzu folgt im anschließenden Abschnitt 3.1 eine kurze Einordnung bislang existierender Forschungsprojekte und der vorliegenden Arbeit, worauf in Abschnitt 3.2 eine Zusammenfassung von Forschungsarbeiten folgt, die den Entwurf von Verfahren zu kooperativen Regelungen in Multiagentensystemen verfolgen. Neben den in Abschnitt 3.2 dargestellten Ansätzen anderer Forschergruppen, findet sich in Abschnitt 3.3 eine Zusammenfassung der Forschungsarbeiten, die am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik in jüngerer Vergangenheit durchgeführt wurden. Das Kapitel schließt in Abschnitt 3.4 mit einer Klassifikation von Beschreibungsmitteln zu kooperativen Regelungen und einer Auswahl anhand von Kriterien, die auf Grundlage der

Eigenschaften eines Fahrzeugagenten aus Kapitel 2 entwickelt werden.

3.1 Anwendungsorientierte Forschungsprogramme zur Verkehrsbeeinflussung

Es existieren unterschiedlichste Forschungsprojekte mit der Zielsetzung der Verbesserung des Straßenverkehrs. Diese lassen sich in Anlehnung an Tabelle 1.1 grundsätzlich nach den Merkmalen des jeweiligen Ziels der Verhaltensbeeinflussung im Straßenverkehr und dem Entstehungsort der Entscheidungen oder den Empfehlungen, wie die Fahrzeuge zu fahren haben, einordnen. So kann das Ziel der Verhaltensbeeinflussung räumlich und zeitlich begrenzt sein, was als lokale Verhaltensbeeinflussung bezeichnet wird, oder eine größere räumliche Ausdehnung und einen größeren zeitlichen Horizont betreffen. Ersteres ist zum Beispiel der Fall bei fahrzeuglokalen Unfallvermeidungsstrategien. Einzelne Fahrzeuge versuchen hier räumlich streng begrenzt eine kritische Verkehrssituation zu vermeiden. Anders ist dies bei der Zielsetzung der Stauvermeidung, die als ein globales Ziel identifiziert werden kann, da es meist Fahrzeuge auf mehreren Streckenkilometern umfasst und der zeitliche Horizont zumeist im Minutenbereich liegt, während dieser bei der Kollisionsvermeidung eher den Bereich weniger Sekunden oder im Bruchteil einer Sekunde umfasst. Die Verhaltensbeeinflussung betrifft stets die einzelnen Fahrzeuge, jedoch kann die Handlungsempfehlung oder eine bestimmte Entscheidung in einer Situation entweder von außen – von einer Zentrale – vorgegeben werden, oder sie wird aufgrund des Datenaustauschs in einem Kollektiv und in diesem Sinne dezentral generiert, d. h. in jedem Fahrzeug auf Grundlage des Austauschs von Informationsvariablen mit anderen Fahrzeugen. Nach diesen Merkmalen lassen sich nun bestehende Projekte einordnen. Dies ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Dort werden die einzelnen Projekte bzw. Unterprojekte, die unter Berücksichtigung der Zielsetzung dieser Arbeit relevant sind, aufgeführt und stichpunktartig in ihrer Zielsetzung und im methodischen Ansatz erläutert sowie mit Literaturstellen ausgewiesen. Es zeigt sich, dass bislang kein Projekt existiert, das auf eine für den Straßenverkehr vollständig verteilte, d. h. dezentrale Entscheidungsfindung abzielt, die ein gewünschtes globales Verkehrsgeschehen erzeugt und inhärent auch lokale, fahrzeugseitige Ziele berücksichtigt, wie z. B. das Entstehen kritischer Verkehrssituationen vermeidet. Dies ist jedoch für die Erzeugung eines zukünftigen Straßenverkehrs notwendig, da ein gewünschtes globa-

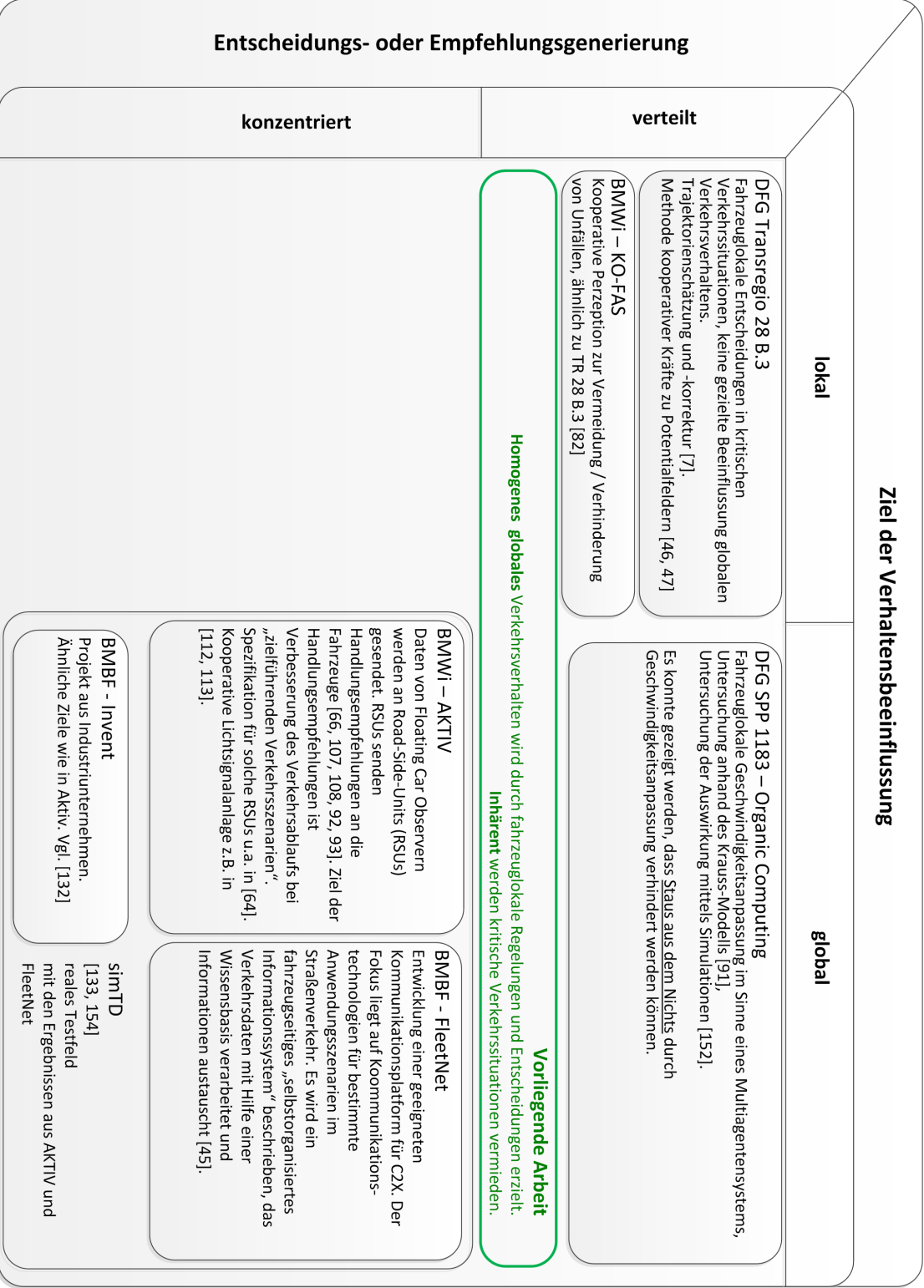
les Verkehrsverhalten nur mittels kooperativer Entscheidungsfindung und Regelung über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erzeugt werden kann. Wie Abbildung 3.1 verdeutlicht, soll die vorliegende Arbeit sich dem Ansatz einer vollständig verteilten Entscheidungsfindung und kooperativen Regelung im Straßenverkehr zur Erzielung eines definierten globalen Verkehrs- und lokalen Fahrzeugverhaltens widmen, wie es konzeptionell in Kapitel 2 aufgezeigt wurde.

3.2 Multiagentensysteme und Verfahren kooperativer Regelungen

Nach der grundsätzlichen Einordnung der vorliegenden Arbeit in bestehende Forschungsprojekte hinsichtlich der Entscheidungsfindung oder -generierung sowie hinsichtlich der Regelungsziele, folgt im Anschluss die diesbezügliche Rezeption von in Frage kommenden Verfahren, um das in Kapitel 2 formulierte Konzept umzusetzen. Zunächst erfolgt hierzu in Abschnitt 3.2.1 zunächst eine Diskussion des Begriffs des Multiagentensystems hinsichtlich dessen Benutzung in der Informatik als Programmierparadigma sowie als Konzept verteilter Regelungen in der Automatisierungstechnik. Danach wird in Abschnitt 3.2.2 der Stand der Forschung hinsichtlich kooperativer Regelungen für Multiagentensysteme aufgezeigt.

3.2.1 Multiagentensysteme im Rahmen eines kooperativen Straßenverkehrs

Die Identifikation des Straßenverkehrs als ein Multiagentensystem induziert methodisch zunächst eine Untersuchung des Programmierparadigmas. So werden und wurden MAS in erster Linie seitens der Informatik als interagierende *Einheiten von Software* behandelt, die mittels Kommunikation globale Problemstellungen lösen. Aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Kommunikationsnetzwerken, insbesondere des Internets, bietet sich eine solche örtlich verteilte Problemlösung auf unterschiedlichen Rechneinheiten geradezu an und lässt selbst komplexe Aufgaben in anwendungsgerechter Zeit lösen. Als typisches Beispiel hierzu kann das SETI-Projekt herangezogen werden [90]. Typische Algorithmen des MAS-Paradigmas werden unter anderem in [136] klassifiziert und unabhängig von einer konkreten Aufgabenstellung ausgewiesen. Zu diesen Algorithmen gehören, um die grundsätzlichen Konzepte dar-



Entscheidungs- oder Empfehlungsgenerierung

Abbildung 3.1: Einordnung vorliegender Arbeit und verwandter Forschungsprogramme nach Regelungsziel und Regelungsressourcen

zustellen, die Konsistenzprüfung von Daten (sog. „Domain-Pruning“) mittels Graphen, die verteilte Optimierung, die Spieltheorie sowie Auktionskonzepte zur Entscheidungsfindung. Eine zentrale Position nimmt bei MAS die Frage ihrer formalen Modellierung ein. So existieren unterschiedliche Konzepte, einzelne Softwareagenten zu attribuieren, wie z.B die Modellierungssprache SQMA, die unter anderem im DFG-Projekt *AUREG* am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik der Universität Stuttgart genutzt wird, um Anforderungen an die zu programmierenden Agenten zu formulieren. Eine andere Metabeschreibungssprache von Agenten stellt die in [137] vorgestellte *MAS-ML* dar. Sie ist eine Erweiterung der UML zur Modellierung von Agenteneigenschaften mittels der zusätzlich eingeführten Stereotypen „Glaube“, „Ziel“ und „Axiome“ sowie der Zuordnung der Stereotypen „Recht“ und „Pflicht“ zu Aktionen eines Agenten. Innerhalb des seitens der Informatik propagierten Programmierparadigmas der Multi-Agenten-Systeme werden jedoch Agenten und deren Interaktionen nicht im Zusammenhang mit der Systemdynamik der Einzelagenten untersucht. Hinsichtlich der Stabilitätsuntersuchungen verbleibt es dort bei der Analyse der Konvergenz verteilter Algorithmen. Die Analyse unter dem Aspekt der Eigendynamik drängt sich jedoch auf, wenn die Agenten zum einen über eine definierte eigene Physik verfügen, z. B. beschrieben durch Bewegungsgleichungen, und die dort verorteten Zustandsgrößen zugleich Interessensvariablen des Kollektivs sind, die über Kommunikationsnetzwerke ausgetauscht werden, während Letztere einen zusätzlichen dynamischen Einfluss in Form von Latenz oder asynchronen Datenaustausch ausüben. Diesen Interessensvariablen und somit einem Kollektiv von Agenten ein definiertes Verhalten aufzuzwingen, ist im Sinne des beschriebenen konzeptionellen Ansatzes und wird innerhalb der klassischen theoretischen Informatik nicht behandelt. Viel eher erscheint dieses Forschungsgebiet derzeit als ein Teil der Automatisierungs- oder Regelungstheorie, da die dortigen Methoden nun auch zum Nachweis der Stabilität von Agentensystemen unter Kommunikationsrestriktionen angewendet werden können. Dieses Forschungsgebiet bezeichnet sich als das der *kooperativen Regelungen*, auf dessen relevante Ansätze im Folgenden eingegangen wird.

3.2.2 Konzeption und Entwurf kooperativer Regelungen im Rahmen von Multiagentensystemen

Das Feld der kooperativen Regelungen ist ein noch relativ junges Forschungsgebiet, das von verschiedenen Arbeitsgruppen sowohl im zivilen als auch militärischen Bereich bearbeitet wird. Insgesamt weisen die Ansätze zu kooperativen Regelungen eine starke Heterogenität bzgl. des Vorgehens und der jeweils angewendeten mathematischen Verfahren auf. Den Ansätzen gemein ist jedoch die Annahme von Systemen mit mehreren gleichartig oder unterschiedlich spezialisiert handelnden Einheiten, die kooperativ eine bestimmte Problemstellung lösen sollen, d. h. es liegt ein MAS vor. Im Folgenden werden einige der gängigsten Lösungsansätze skizziert und hinsichtlich ihrer Methodik, Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit sowohl bzgl. des Reglerentwurfs als auch der Systemanalyse diskutiert. Insbesondere sollen hier Beiträge betrachtet werden, die auf Formations-Regelungen von Fahrzeugen angewendet wurden bzw. das Potenzial haben, dafür genutzt zu werden.

Grundsätzlich lassen sich die Konzepte kooperativer Regelungen von Fahrzeugen auf der einen Seite in den grundsätzlichen Lösungsansatz bezüglich der Regelungsressourcen und in das jeweils genutzte oder diesbezüglich entwickelte mathematische Beschreibungsmittel gliedern. Auf der anderen Seite können dem dem jeweils angewendeten mathematischen Beschreibungsmittel bestimmte Fähigkeiten zugeordnet werden. Zu diesen grundlegenden Fähigkeiten im Sinne eines MAS gehört die Umweltmodellierung, daraus folgend die Trajektoriengenerierung sowie die Formationsregelung und damit verbunden die Methode für die lokale Reglerauslegung.

Die grundsätzlichen Konzepte hinsichtlich der Regelungsressourcen sind „(physikalischer) Leader-Follower“, „virtual Leader“ sowie die vollständig dezentrale Realisierung einer kooperativen Regelung. Diesen und den Systemfunktionen sind die zumeist genutzten Verfahren wie folgt zuzuordnen: Potenzialfelder, Graphentheorie, „Model Predictive Control“ und andere gütemaßbasierte sowie weiter gefasste nichtlineare Verfahren.

Beim klassischen „Leader-Follower“-Ansatz werden ein oder mehrere physikalische Führungsfahrzeuge definiert, deren Trajektorien entweder bekannt sind oder durch modellierte Umweltbedingungen ermittelt werden. Anschließend werden für die Folgefahrzeuge Reglergesetze entworfen, sodass diese in definierter Art dem (den) Führungsfahrzeug(en) folgen. So wird zum Beispiel in [44] mittels Minimierung eines

Gütemaßes ein fahrzeuglokaler Regelungsalgorithmus ausgelegt. Die Trajektorie des Führungsfahrzeugs wird hierbei als bekannt angenommen. Der „Leader-Follower“-Ansatz wird ebenfalls in [106] verwendet. Das genutzte mathematische Beschreibungsmittel entspricht dort eingeführten „Formations-Graphen“ zur Modellierung von Formationen, wobei für die Reglerauslegung nichtlineare Zustandsrückführungen eingesetzt werden. Ähnliche Modellierungskonzepte werden auch in [2] oder [5] beschrieben. Dort werden speziell für Fahrzeuge unter nichtholonomen Randbedingungen Reglergesetze formuliert und analysiert, die zwar „Brockett’s Theorem“ über die vollständige Steuerbarkeit verletzen, jedoch trotzdem einzelnen Aufgaben von kooperativen Systemen gerecht werden können. In diesen Ansätzen wird weder das Kommunikationsnetz modelliert, noch die Umgebung oder deren Wahrnehmung berücksichtigt.

Beim „virtual Leader“-Ansatz werden seitens der kooperativen Fahrzeuge ein oder mehrere virtuelle Führungsfahrzeuge generiert. Die Trajektorie dieser virtuellen Fahrzeuge wird vorgegeben oder in Abhängigkeit der Umgebung ermittelt. Durch lokale Regler folgen die Fahrzeuge den virtuellen Führungsfahrzeugen in definierten Fahrtrichtungen und Abständen. Dieser Ansatz wird beispielsweise in [103] und [104] verfolgt. Die Reglerauslegung kann mit unterschiedlichen mathematischen Methoden erfolgen. Zum Beispiel mittels der Definition von Potenzialfeldern zwischen den Fahrzeugen wie in [103] oder mittels der Definition einer geeigneten Control-Ljapunov-Funktion wie in [104]. Die Trajektoriengenerierung der virtuellen Führungsfahrzeuge wird dort nicht behandelt. Ebenfalls wird das Kommunikationsnetz nicht mitberücksichtigt.

Ansätze, die taktische Aufgabe der Trajektoriengenerierung vollständig auf die Fahrzeuge zu verteilen, werden von einigen Wissenschaftlern als wesentlicher Ansatz angesehen, um die Probleme der oben dargestellten referenziellen Regelansätze zu lösen, die insbesondere in mangelnder Robustheit gegenüber Störungen, z. B. durch Kommunikationsausfälle und hoher Rechenzeit liegen [41]. In [54] wird ein Ansatz vorgestellt, welcher auf der Modellierung der Umgebung durch künstliche Potenzialfelder beruht sowie zur Kollisionsvermeidung und Formationserzeugung zusätzlich pro Fahrzeug ein eigenes umgebendes Potenzialfeld modelliert. Durch Gradientenbildung der Superposition beider Potenzialfelder und einer darauf basierenden Definition einer Gleitfläche kann ein Sliding-Mode-Regler ermittelt werden, der dezentral eine Formation der Fahrzeuge realisiert. Ebenfalls auf künstlichen Potenzialfeldern

basiert der in [55] präsentierte Ansatz einer verteilten Regelung. Hier werden mit Hilfe von Potenzialfeldern sogenannte „Queues“ definiert. Diese Potenzialfelder können online so angepasst werden, dass die Fahrzeugformation in der Lage ist, Hindernissen auszuweichen.

Weitere Ansätze für die Auslegung einer vollständig verteilten Regelung finden sich unter anderem in [41, 105, 118, 159, 163]. Die Verfahren zur Trajektoriengenerierung reichen hier von der Definition einer Trajektorienform mittels eines Polynoms und Bestimmung der Koeffizienten in Abhängigkeit von sensierten Hindernissen wie in [159] über gradientenbasierte Anordnung der Fahrzeuge durch die Definition eines graphenbasierten Gütemaßes wie in [163] bis zu Verfahren die als *Distributed Consensus* zusammengefasst werden können.

In [41] werden die Bedingungen für einen Konsens von Informationen unterschiedlicher Agenten herausgestellt. In [105] wird ein Rahmenwerk für die Beschreibung von kooperativen Regelungen mittels Konsens-Algorithmen vorgestellt, das unter Berücksichtigung des Kommunikationsnetzwerks die Dynamik des geregelten verteilten Systems beschreiben kann. Die Kopplung der einzelnen Fahrzeuge erfolgt über ein sogenanntes „Consensus Feedback“, das mittels der Laplace-Matrix des assoziierten Kommunikationsgraphen beschrieben wird. Wie ein geeignetes Reglergesetz für das kooperative System gewählt werden kann, ist dort nicht beschrieben. Auch werden hier nicht sich ändernde Kommunikationstopologien berücksichtigt. Hierzu kann jedoch [118] als eine sehr vollständige Zusammenstellung des bisherigen Stands der Forschung zu kooperativen Regelungen aufgefasst werden, die auf *Distributed Consensus* basieren. Als wesentlicher Beitrag der Autoren Ren und Beard kann hier deren Konzept verstanden werden, aus globalen Nebenbedingungen gütemaßbasiert lokale Regler herzuleiten. Zu der Problemstellung sich ändernder Kommunikationstopologien finden sich in [118] die aktuellen Forschungsergebnisse und können unter anderem durch Beiträge wie in [3, 4, 5, 97, 140] ergänzt werden. In diesen wird speziell auf die Fragestellungen von Rauschen, Sensorfehlern oder Feedback-Intermittenz eingegangen. Eine Eigenschaft der Distributed Consensus Algorithmen ist, dass die Strategien „Leader-Follower“ und „virtual Leader“ ebenfalls modelliert und mit diesem Rahmenwerk realisiert werden können.

Die Nebenbedingungen, die nach Ren und Beard (vgl. [118]) als Gütemaß modelliert werden, sind aus der Anwendungsperspektive von den dynamischen Umgebungsbedingungen direkt abhängig. Um diese zu modellieren, können auch künstli-

che Potenzialfelder herangezogen werden (s.o.). In [165] wird alternativ eine Möglichkeit vorgeschlagen, die auf einem hierarchischen Modellkonzept zur Repräsentation der Umgebung aufbaut. Sie basiert auf der Modellierung einer Karte durch Graphen, wobei die Straßen ähnlich einem Zellularautomaten wiederum in Segmente aufgeteilt werden. Die Fahrzeuge werden hier als diskrete Systeme modelliert. Es handelt sich bei diesem Konzept aber um die Realisierung einer „Leader-Follower“-Architektur.

Es existieren neben o.g. neueren methodischen auch ältere, eher anwendungsnahe Vorarbeiten aus dem Bereich der „Regelungen im Verkehr“, wie sie in einer Rückblende über die Zusammenführung zweier Fahrzeugströme in [122] zusammenfassend geschildert werden. Die Autoren stellen dort ein in den 80er Jahren entwickeltes Steuerungs- und Regelungskonzept eines Zusammenführungsvorgangs vor und verweisen auf dessen komplexen hybriden Charakter: dieser sei „nichtlinear ereignisdiskret/kontinuierlich und strukturvariabel“. Eine solche Automatisierungsaufgabe, wie sie bei unterschiedlichen Situationen im Straßenverkehr vorkommt, lasse sich nicht geschlossen mit Standardmethoden behandeln, was den Grund für die in diesem Artikel beschriebenen eher heuristischen, gleichwohl praxisnahen Ansätze darstellt.

Aus den obigen Abschnitten geht hervor, dass es sich bei den betrachteten verteilten Regelungssystemen stets um Teilsysteme (Fahrzeuge) handelt, die unter den Randbedingungen der Umgebung (Infrastruktur) und des Kommunikationsmittels (VANET – vehicular ad hoc network) agieren. Solche Systeme können also als „digital vernetzte dynamische Systeme“ bezeichnet werden, wozu die DFG ein Schwerpunktprogramm (1305) eingerichtet hat. Daher sollen die in Bezug auf vorliegende Arbeit relevanten Projekte diskutiert werden:

- Entwicklung asynchroner prädiktiver Regelungsverfahren für digital vernetzte Systeme (ASYPRED)
- Regelung von Fahrzeugkolonnen mit topologisch veränderlichem Kommunikationsnetzwerk auf der Basis von Energiemethoden
- Stabilität und Stabilisierung großer digitaler Netzwerke
- Autonomie und Kooperation in digital vernetzten Regelungssystemen

Entwicklung asynchroner prädiktiver Regelungsverfahren für digital vernetzte Systeme. Im Projekt *ASYPRED* ist das primäre Ziel der Entwurf eines lo-

kalen modellprädiktiven Regelungsverfahrens für eine vollständig verteilte Architektur. In [36] werden Einzelsysteme von Fahrzeugen wert- und zeitdiskret modelliert. Der Reglerentwurf erfolgt mittels der Definition eines geeigneten Gütemaßes, wobei als Nebenbedingung Kollisionsfreiheit angenommen wird und die Kopplung zwischen den Fahrzeugen somit allein in den Nebenbedingungen erfolgt. Zur Kollisionsvermeidung, auch unter Einfluss von Latenzzeiten, werden die ausgetauschten Trajektorien zwischen den Fahrzeugen anhand der pro Zeitschritt vorliegenden Randbedingungen (Menge der kollisionsfreien Zustände) überprüft. Haben alle Agenten die neue Trajektorie bestätigt, werden die Randbedingungen agentenseitig durch die resultierenden neuen Nebenbedingungen ersetzt, welche Kollisionsfreiheit sicherstellen. Anschließend wird agentenseitig das lokale Optimierungsproblem mittels nichtlinearer Programmierung gelöst. Dieser Algorithmus wird iterativ ausgeführt.

Regelung von Fahrzeugkolonnen mit topologisch veränderlichem Kommunikationsnetzwerk auf der Basis von Energiemethoden. Dieses Projekt fußt auf den Ergebnissen der Längsdynamikregelung von Schwerlastfahrzeugen in Kolonnen, wie sie unter anderem in [160, 161, 162] entwickelt wurden. Dort wurde eine MPC-basierte Regelung in einer „Leader-Follower-Architektur“ vorgestellt (vgl. [160]). Die Regelung wurde für unterschiedliche Kommunikationsstrukturen simuliert. Latenzzeiten sind dabei nicht mit berücksichtigt worden. In [162] werden unterschiedliche Kommunikationsstrukturen hinsichtlich der Anwendbarkeit auf Kolonnenfahrt diskutiert. Es wird die Vorgabe von Referenztrajektorien seitens einer Leitwarte empfohlen, und zwar zur Erfüllung der Zielsetzungen einer besseren Straßenkapazitätsausnutzung und eines hohen Fahrkomforts durch geringere Abstände und durch Anpassen der Trajektorien an definierte Rahmenbedingungen. Für die Reorganisation einer Kolonne werden direkte Kommunikation und Buskommunikation untersucht. Als wesentlicher Aspekt wird genannt, dass stets „String-Stabilität“ gemäß [143] sichergestellt werden muss. Buskommunikation wird hier als der bessere Lösungsansatz angesehen, sei jedoch mit höherem technischem Aufwand verbunden. In [161] wird ein alternatives Verfahren zur Reglerauslegung der Fahrzeuge in einer Kolonne vorgestellt. Es basiert auf einem Lagrange-Ansatz für die Fahrzeugdynamik, wonach anschließend mittels „Kinetic Shaping“ die Regelungs-Lagrangefunktion berechnet wird. Hierbei wird die Stabilität Ljapunov-basiert sichergestellt, indem die kinetische Energie als Ljapunov-Funktion herangezogen wird. Es wird dabei eine

direkte Kommunikationsstruktur angenommen. Das Verfahren sichert unter dieser Annahme die notwendigen Bedingungen für String-Stabilität. In [16] wird der energiebasierte Ansatz weiterentwickelt, wobei es sich nicht mehr allein um eine Kolonne an Fahrzeugen handelt. Vielmehr wird dort das Prinzip genutzt, Fahrzeuge auf einer Ebene in einem konstanten Abstand zueinander zu koordinieren. Die Fahrzeuge werden hierbei als Punktmasse angenommen, ohne Berücksichtigung z.B. nichtholonomer Nebenbedingungen. Eine Kommunikationstopologie wird nicht mitberücksichtigt. Der Regelungsansatz verspricht jedoch Vorteile, die fahrzeugseitigen Regelungen mit „hoher physikalischer Einsicht“ auszulegen und für den Stabilitätsnachweis Energiefunktionen nutzen zu können.

Ein zweiter Teil dieses Projektes beschäftigt sich mit Sicherheitsaspekten des verteilt geregelten Systems bezüglich der Eigenschaften des Kommunikationsnetzwerks. Hierzu werden hybride Modellansätze verfolgt. So werden in [98] unterschiedliche Werkzeuge zur Modellierung analysiert. Dabei wird angenommen, dass das geregelte System über einen strukturvariablen Regler verfügt, dessen schaltender Anteil in Abhängigkeit des Kommunikationsnetzes implementiert ist.

Stabilität und Stabilisierung großer digitaler Netzwerke sowie Autonomie und Kooperation in digital vernetzten Regelungssystemen. Während die Beiträge der beiden bisher skizzierten Projekte des SPP 1305 insbesondere die Formationsregelung von Fahrzeugen betreffen, behandeln die Projekte „Stabilität und Stabilisierung großer digitaler Netzwerke“ sowie „Autonomie und Kooperation in digital vernetzten Regelungssystemen“ die Erforschung grundsätzlicher Prinzipien der Modellierung und Analyse des Datenaustauschs über das Netzwerk, bzw. im Letzteren die Untersuchung unterschiedlicher Kopplungsstrukturen und deren Möglichkeit zur Kooperation. Langfristig wird erwartet, dass Ergebnisse wie zum Encoder/Decoder-Schema, z. B. aus [120], in ein Rahmenwerk für kooperative Fahrzeugregelungssysteme integriert werden können.

3.3 Vorarbeiten des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA)

Am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik wurden in der Vergangenheit Vorarbeiten mit Bezug auf die Zielrichtung dieser Arbeit geleistet. Sie

lassen sich nach den folgenden Schwerpunktthemen strukturieren:

1. Regelungstechnik (Fahrzeugregelung)
2. Modellierung und Analyse diskreter sowie stochastischer und hybrider Systeme
3. Steuerungssynthese diskreter und diskret-kontinuierlicher Systeme
4. Kommunikationsmodellierung
5. Verteilte Simulation, Optimierung
6. Konzeption von Multiagentensystemen

3.3.1 Fahrzeugregelung

Auf dem Gebiet der Fahrzeugregelung wurde am iVA vornehmlich der Entwurf nicht-linearer robuster Regelungsverfahren für die Längs- und Querdynamik behandelt [9, 50, 62, 49, 51]. In der jüngeren Vergangenheit fanden auch strukturvariable Regelungsansätze Eingang in das Forschungsgebiet der Fahrzeugautomatisierung, wie es in [39] oder in [77] zu finden ist, dessen wesentliche Ergebnisse in einem Beitrag der ATZ 2/2010 präsentiert werden [73]. Ergänzend liefen in der Vergangenheit Arbeiten in der Verkehrs- und Fahrzeugregelung im Schienenverkehr auch bezüglich der Analyse konkurrierender Betriebs- und Regelungskonzepte sowie ihrer Entwurfsmethoden [146, 148, 65], wofür eine besondere Expertise auf Grundlage der Petrinetzmodellierung entwickelt wurde, die mittlerweile auch die Zuverlässigkeit mit einschließt [129].

3.3.2 Modellierung und Analyse diskreter sowie stochastischer und hybrider Systeme

Innerhalb des DFG Schwerpunktprogramms „Analyse und Synthese kontinuierlich-diskreter Systeme“ (KONDISK) wurden die Projekte MASKoBA und MOVESYN II bearbeitet. In MASKoBA konnten mit Hilfe höherer Petrinetze stochastisch-kontinuierlich-diskrete Modelle des räumlich ausgedehnten Fahrzeugverhaltens in Bahnsystemen erstellt werden [22], die mittels symbolischer Verfahren analysiert wurden. Kohärent hierzu war das Projekt MOVESYN II gestaltet, in welchem hybride höhere Petrinetze definiert wurden, deren Semantik sich an die von Coloured

Petri Nets anlehnt [21]. Zum Zwecke umfangreicherer Modellierungsmächtigkeit der Petrinetz-Semantik wurde in [17] und [19] das Beschreibungsmittel erweitert, um diskret-kontinuierlich-stochastische Prozessmodelle homogen erstellen und analysieren zu können. Die Erfahrungen aus diesen Publikationen zur Modellierung mittels Petrinetzen fanden jüngst Eingang in die Norm DIN IEC 62551 (Status CCDV — Draft circulated as Committee Draft with Vote), welche vom iVA initiiert und vorangetrieben wurde. Die dort dargestellten Methoden dienen vornehmlich zur Leistungs- und Zuverlässigkeitsanalyse technischer Systeme mittels Petrinetzen. Letztere zeichnen sich durch ihre Integrationsfähigkeit in der Modellierung technischer Systeme aus, wie es sich auch in einem Vergleich von Modellierungstechniken zur Zuverlässigkeitsanalyse zeigt [127].

3.3.3 Steuerungssynthese diskreter und diskret-kontinuierlicher Systeme

Neben der Modellierung und Analyse hybrider Modelle war ein Schwerpunkt des iVA im DFG Schwerpunktprogramm KONDISK die (automatisierte) formale Steuerungssynthese. So wurde unter anderem in [18, 95, 101, 102] ein auf der Erreichbarkeitsanalyse von Petrinetzen basierendes Verfahren zur Ermittlung von Kontrollstrukturen diskreter Ereignissysteme vorgestellt, die den jeweiligen Systemspezifikationen genügen. Dieses Verfahren wurde auf diskret-kontinuierliche Modelle erweitert, was unter anderem in [126] beschrieben ist und mit multikriterieller Optimierung mittels genetischer Algorithmen kombiniert wurde. Letzteres fand insbesondere in der Disposition und für Instandhaltungsstrategien Anwendung [19, 115, 149, 150, 151].

3.3.4 Simulation und Optimierung

In der jüngeren Vergangenheit finden sich Beiträge des iVA zu ereignisdiskreten und hybriden Systemen, die insbesondere deren verteilte Optimierung mittels genetischer Algorithmen, sowie deren verteilte Simulation thematisieren [130, 149]). Diese Verfahren finden sowohl Anwendung in der Verbesserung des Schienenverkehrs selbst [151] als auch in dessen Instandhaltungsprozessen [114, 116]. Die entwickelten Methoden wurden außerdem zur modellgestützten Steuerungssynthese an Lichtsignalanlagen verwendet, wobei hier stochastische Petrinetze zur Modellierung

des Verkehrsverhaltens urbaner Straßennetze genutzt wurden. Die Steuerungssynthese erfolgte durch Optimierung mittels genetischer Algorithmen [1, 115]. Neben der Modellierung und Simulation urbaner Straßennetze werden am iVA außerdem Arbeiten zur Verbesserung von Verkehrsflusssimulationen mittels valider mikroskopischer und gleichzeitig makroskopischer Optimierungsansätze durchgeführt, deren erste Ergebnisse in [25] veröffentlicht wurden. Hiermit soll ermöglicht werden, den Einfluss von Fahrerassistenzsystemen auf das Verkehrsverhalten anhand von Simulationen beurteilen zu können, vgl. [24, 26, 27, 131].

3.3.5 Kommunikationsmodellierung

Die Erfahrungen der Modellierung mittels höherer Petrinetze konnten in unterschiedlichen Arbeiten dazu genutzt werden, Kommunikationsnetzwerke hinsichtlich ihrer Struktur und ihres Verhaltens zu modellieren. So wurde z.B. in [87] und [86] das Topologie- und Zeitmanagement von Feldbussen mittels Petrinetzen modelliert und parametrisiert. Diese Vorarbeiten konnten in [134] und [135] genutzt werden, um ein hinsichtlich des Energieverbrauchs optimiertes Feldbussystem zu entwerfen. In [57, 58, 123] wurde eine offene Kommunikationsarchitektur mittels einer petrinetz-basierten Analyse entworfen. Die Modellierungs- und Verifikationsmethoden wurden u.a. in [94] auf Funknetze erweitert und dort zur Initialisierung und Konfigurationsermittlung genutzt.

3.3.6 Konzeption von Multiagentensystemen

Innerhalb des Forschungsgebiets „Kooperative Systeme“ wurden in der Vergangenheit am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik unterschiedliche agentenbasierte Konzepte für den Transportbereich formuliert, die eine Optimierung der Verkehrssicherheit und der Verkehrsqualität zum Ziel hatten. Zum einen wurde im Projekt Bahn 2050 ein agentenbasierter Ansatz für die Logistik im Schienenverkehr formuliert [12, 13] und zum anderen eine entsprechende Middleware für das Design und den Test von konfigurierbaren Agenten entworfen [89, 88]. Für den Straßenverkehr wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Lösungskonzepte zur Modellierung und Entwicklung von Regelbasen eines kooperativen Straßenverkehrs formuliert [69]. Der zentrale Ansatz liegt in der Umgebungsmodellierung sowie Entscheidungsfindung mittels Petrinetzen, während der Austausch der notwendigen

Zustandsgrößen mittels eines Konsensalgorithmus erfolgt. Das grundsätzliche Konzept findet sich in [68], während auf dieser Basis entworfene Algorithmen in [70] präsentiert wurden. Weitere Untersuchungen zur Strukturanalyse der petrinetzbasierten Entscheidungsfindung finden sich in [72] und [75]. In [74] und [76] wurde eine Einordnung des Konzepts in den Rahmen zukünftiger Verkehrsorganisation vorgenommen.

3.4 Klassifikation und Auswahl von Beschreibungsmitteln für die Realisierung der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten

Auf Grundlage der zuvor diskutierten Ansätze für den Entwurf kooperativer Regelungen und Entscheidungsmechanismen sollen nun Verfahren, d. h. Beschreibungsmittel und damit verbunden Methoden, ausgewählt werden, die als besonders geeignet erscheinen, Algorithmen für die Realisierung der Funktion der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten zu ermitteln. Hierzu wird in zwei Schritten vorgegangen. Zunächst wird im sich anschließenden Abschnitt 3.4.1 ein Fazit zu den vorgestellten kooperativen Regelungsverfahren gezogen. Gleichzeitig werden diese klassifiziert, was mittels eines UML-Klassendiagramms abgebildet wird. Danach werden in Abschnitt 3.4.2 auf Grundlage des Fahrzeugagenten-Konzepts und mittels der vorgenommenen Klassifikation Kriterien definiert, die für die anschließende Auswahl von Beschreibungsmitteln herangezogen werden.

3.4.1 Beurteilung von Beschreibungsmitteln für kooperative Regelungen und Entscheidungsmechanismen sowie deren Klassifikation

Wie in den Abschnitten 3.1 und 3.2 dargelegt wurde, existieren unterschiedliche Vorarbeiten zu kooperativen Regelungsverfahren und Entscheidungsmechanismen hinsichtlich der Kolonnen- bzw. Formationserzeugung und deren Stabilität. Sie weisen jedoch eine große Vielfalt bezüglich der methodischen Ansätze und mathematischen Modellierung der Formation und der Umgebungsbedingungen auf. Zudem erscheinen diese Ansätze auf die Nebenbedingungen des Straßenverkehrs nicht übertragbar, und

zwar insbesondere wegen seiner räumlichen Diskretisierung in Form von Fahrstreifen. Zwar werden Konzepte der Gruppenbildung, z. B. in [46], und auch der kooperativen Bewegungsplanung, wie in [47], behandelt, jedoch basieren die jeweils vorgeschlagenen Modellierungsansätze auf unterschiedlichen mathematischen Beschreibungsmitteln, die sich nur schwer zu einem einheitlichen Lösungsansatz integrieren lassen. Genauso verhält es sich bei den beschriebenen Ansätzen des DFG TR 28 B.3. Als ein Ansatz, der nah an der Problemstellung vorliegender Arbeit angelehnt ist, lässt sich das in [152] innerhalb des DFG SPP *Organic Computing* vorgestellte Konzept anführen. Jedoch basiert das dortige Verfahren, das Stauvermeidung zum Ziel hat, auf einem simulationsbasierten Entwurf durch das Krauß-Verkehrsmodell [91]. Letzteres stellt ein mikroskopisches Verkehrsmodell dar, das jedoch zur Reproduktion makroskopischen Verhaltens erstellt wurde, so wie z. B. „Staus aus dem Nichts“. Laut Krauß wurde bei der Modellbildung nicht das Ziel verfolgt, auch das mikroskopische Verhalten der Fahrzeuge durch realistische Geschwindigkeitsverläufe oder Abstandsverläufe mit abzubilden. Daher ist die Auslegung der in [152] formulierten Regelbasis (Geschwindigkeitsadaption), die letztlich ein bestimmtes mikroskopisches Verhalten hervorruft, sowie die Verifikation der Auswirkungen auf Grundlage des Krauß-Modells grundsätzlich zu hinterfragen.

Über die methodischen Probleme hinaus erscheinen die vorgestellten Ansätze nicht anwendungsgerecht. So können unterschiedliche Klassen von Fahrzeugen, unterschiedliche Intentionen oder auch technische Eigenschaften nicht modelliert werden. Desweiteren wird eine variierende Umgebung in Form der Veränderung der Fahrstreifenanzahl nicht berücksichtigt. Das liegt zum Teil darin begründet, dass viele der vorgestellten Verfahren eher dem Luft- und Raumfahrtsektor und damit verknüpft vornehmlich militärischen Anwendungen entstammen. Unter diesen Betrachtungen wird deutlich, dass Formationserzeugung und -stabilität nur einen Aspekt des hier zu behandelnden Anwendungsbereichs darstellt. Viel eher wird durch Veröffentlichungen wie [122] deutlich, dass die Forderung in einem vereinheitlichenden Konzept für die Modellierung des dort ausgewiesenen hybriden Verhaltens von Vorgängen im Straßenverkehr liegt.

Ein hybrides System bezeichnet das gleichzeitige Auftreten von diskreten und kontinuierlichen Verhalten der Systemzustände [40, 59]. In Bezug auf den vorliegenden Anwendungsfall ist daher zu identifizieren, welche Systemanteile als diskret und als kontinuierlich angesehen werden können. Die Fahrzeugbewegung an sich wird zu-

meist mit zeitkontinuierlichen Bewegungsgleichungen höherer Ordnung modelliert. Ein definiertes Folgen einer Trajektorie wird daher zumeist mit zeitkontinuierlichen Regelungsverfahren ermöglicht, die jedoch durchaus strukturvariabel sein können. Deren Implementierung erfolgt zeitdiskret und auch quasikontinuierlich, sofern entsprechende Hardware eingesetzt wird. Häufig werden bei den kooperativen Regelungsverfahren vereinfachte Annahmen über die Fahrzeugbewegung gemacht, sodass eine Betrachtung der unterlagerten fahrzeuglokalen Regler ausbleiben kann. Auch das Problem der Steuerbarkeit unter nichtholonomen Randbedingungen, wie es bei Fahrzeugen Realität ist, wird häufig nicht berücksichtigt; stattdessen wird eine einfache oder doppelte Integrator-Dynamik angenommen. Zur Auslegung von fahrzeuglokalen Reglern werden ebenfalls Vereinfachungen vorgenommen. Zumeist wird die Fahrzeuglängsbewegung als entkoppelt von der Fahrzeugquerbewegung angenommen wie in [50] und [62]; außerdem werden häufig lineare Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen modelliert, wie z. B. in [38], was jeweils ein robustes unterlagertes Regelungsverfahren erfordert. Durch Vorgabe von Sollgeschwindigkeiten und Querpositionen an diese unterlagerten Regler eines jeden Fahrzeugs einer Gruppe ist es daher grundsätzlich möglich, definierte Relativpositionen zwischen den Fahrzeugen einzuhalten. Die Erzeugung der hierzu notwendigen Solltrajektorien von relativen Längs- und Querpositionen pro Fahrzeug wird durch übergeordnete Formationsregelungen ermöglicht, wie sie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wurden. Rekonfigurationen von Fahrzeugformationen werden durch Umgebungseinflüsse induziert, die auf die betreffenden Fahrzeuge einwirken. Umgebungseinflüsse können zum einen sensierte Umweltparameter sein, zum anderen empfangene Informationsvariable anderer Fahrzeuge. Hierbei können die Umwelt sowie der Datenaustausch entweder als sich kontinuierlich ändernd oder ereignisorientiert modelliert werden. Eine Modellierung sollte hierbei anwendungsnah erfolgen und gleichzeitig die Anzahl der Zustände minimieren, um die Rechenzeit der zu ermittelnden Steuer- und Regelungsalgorithmen zu begrenzen.

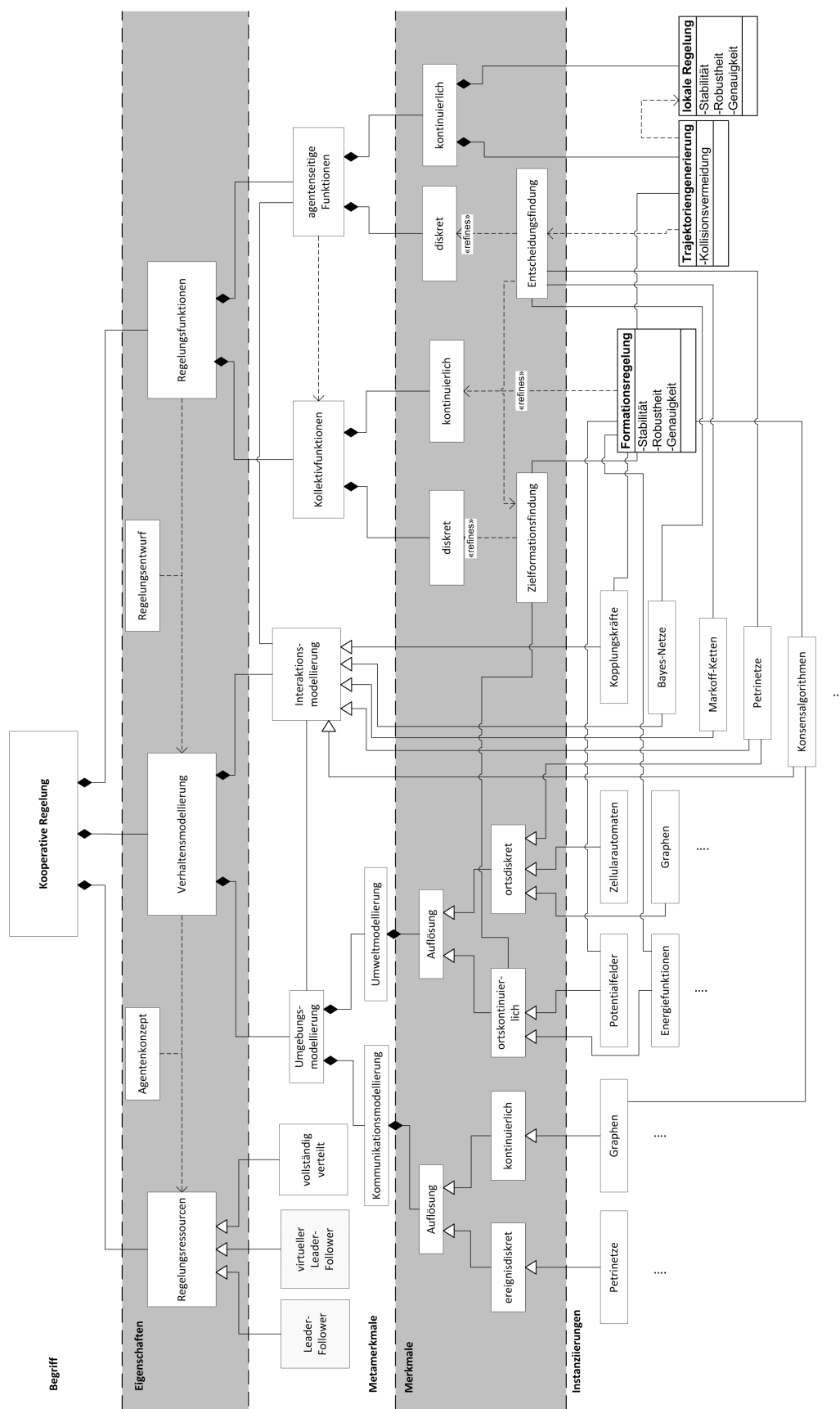
Rekonfigurationen von Formationen können unter dieser Forderung als Zustandsänderungen verstanden werden, die durch ereignisdiskrete Entscheidungen hervorgerufen werden. Diese Entscheidungen werden aufgrund von umgebungsseitigen Anreizen und der daraufhin agentenseitig generierten Zielformation induziert. Dies macht eine Formation von Fahrzeugen zu einem hybriden System, auch wenn die Bewegung und die Umwelt, sowie der Datenaustausch kontinuierlich modelliert werden.

Abbildung 3.2 verdeutlicht diese Zusammenhänge durch die Dekomposition des Begriffs *Kooperative Regelung* in Anlehnung an den *Terminology Engineering Process* nach Schnieder [141] und hat neben der terminologischen Analyse auch die Einordnung der im Stand der Forschung genannten Verfahren zum Zweck. Als Beschreibungsmittel wurde hier die Notation der *Klassendiagramme* aus der *UML* gewählt.

So konstituiert sich eine *Kooperative Regelung* durch die Eigenschaften *Regelungsressourcen*, *Verhaltensmodellierung* und den implementierten *Regelungsfunktionen*. Diese Eigenschaften sind desweiteren untereinander verknüpft. So bedingen die gewählten *Regelungsressourcen* über das zugrunde gelegte Agentenkonzept eine bestimmte *Verhaltensmodellierung*, was z. T. die dortigen Verfahren bezüglich der verwendeten Beschreibungsmittel einschränkt. Das Beschreibungsmittel, das für die *Verhaltensmodellierung* herangezogen wird, ermöglicht die Modellierung von Handlungen in bestimmten Umgebungsbedingungen und dient über assoziierte Reglerentwurfsverfahren der Herleitung von *Regelungsfunktionen* des Fahrzeugagenten. Diese Eigenschaften lassen sich weiter in sog. *Metamerkmale* unterteilen. So finden sich die beschriebenen grundsätzlichen Realisierungskonzepte als Instanzen ausgewiesene Konzepte bzgl. der *Regelungsressourcen* mit „Leader-Follower“, „virtueller Leader-Follower“ und „vollständig verteilt“. Die *Verhaltensmodellierung* hat die Konstituenten „Umgebungsmodellierung“ und „Interaktionsmodellierung“. Beide sind jedoch bezüglich des Beschreibungsmittels der Modellierung als miteinander (kausal) assoziiert anzusehen, da eine Interaktion eines Agenten aufgrund gewisser Umgebungsbedingungen erfolgt. Die *Regelungsfunktionen* sind in Kollektivfunktionen und agentenseitige Funktionen zu unterscheiden. Die Realisierung bestimmter Kollektivfunktionen bedingt jedoch die Implementierung bestimmter agentenseitiger Funktionen im Sinne des zu erzeugenden kooperativen Verhaltens.

Auf der sich anschließenden Merkmalsebene werden die Metamerkmale weiter verfeinert, um letztlich auf der Instanziierungsebene die verwendeten Beschreibungsmittel anzugeben und diese in den Kontext der Eigenschaften und Metamerkmale zu stellen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Dekomposition nur für vollständig verteilte *Regelungsressourcen* vorgenommen wurde, weshalb „Leader-Follower“ und „virtueller Leader-Follower“ in der Abbildung 3.2 grau unterlegt sind.

Die *Umgebungsmodellierung* besteht aus den Merkmalen der Kommunikationsmodellierung und Umweltmodellierung, da der Austausch von fahrzeugseitigen Infor-



mationsvariablen ebenfalls zur Umgebungsperzeption eines Agenten gezählt werden soll. Wie bereits erwähnt, lässt sich nun unterscheiden, ob die jeweilige Modellierung diskret oder kontinuierlich erfolgt. Auf der Seite der Kommunikation kann diese entweder ereignisdiskret, im Sinne einer empfangenen Nachricht, oder kontinuierlich, im Sinne eines Broadcasts, modelliert werden. Hinsichtlich der Umwelt lässt sich in ortskontinuierliche und ortsdiskrete Modellierung unterscheiden. Dem zuzuordnen sind auf unterer Ebene Beschreibungsmittel, die diese Merkmale instanziiieren, wie z. B. Petrinetze bei ereignisdiskreter und Graphen bei kontinuierlicher Kommunikationsmodellierung. Typische Beispiele auf der Seite der Umwelt für ortskontinuierliche Modellierungen sind Potentialfelder oder Energiefunktionen, während zur ortsdiskreten Modellierung Zellularautomaten, wie z. B. das Modell nach Nagel und Schreckenberg [100], Graphen oder Petrinetze zu zählen sind. Unter der Ebene der Interaktionsmodellierung sind keine weiteren Merkmale zu definieren. Aus dieser werden direkt Beschreibungsmittel instanziiert, die genutzt werden, um Interaktionen zwischen Agenten abzubilden, wie die hier angegebenen Kopplungskräfte, Bayes-Netze, Markoff-Ketten, Petrinetze und Konsensalgorithmen.

Die Kollektivfunktionen gliedern sich analog zu vorherigen Betrachtungen in diskrete und kontinuierlich aufzufassende Funktionen der Regelung. Im Blick auf die beschriebene Anwendung und den Stand der Forschung ist als diskrete Kollektivfunktion die Zielformationsfindung der Fahrzeugagenten zu nennen. Die kontinuierliche Kollektivfunktion entspricht der Formationsregelung mit den Attributen der Stabilität, Robustheit und der Genauigkeit des geregelten Systems.

Bestimmte mathematische Beschreibungsmittel der Umgebungsmodellierung sind nun der Zielformationsfindung bzw. der Formationsregelung zuzuordnen, respektive damit assoziiert. So ist eine ortskontinuierliche Umweltmodellierung mit einer Formationsregelung zu assoziieren, da beispielsweise die zu erzielende Formation sich durch die Superposition der dort ortskontinuierlich modellierten Felder oder Energiefunktionen ergibt. Hierdurch ist die Formationsregelung selbst ebenfalls mit der Zielformationsfindung assoziiert, da diese von dem jeweiligen Verfahren der Ortsmodellierung abhängt.

Bei den agentenseitigen Funktionen wird ebenfalls eine Unterteilung in diskrete und kontinuierliche Regelungsfunktionen vorgenommen. Die diskreten Funktionen können als agentenseitige Entscheidungsfindungen identifiziert werden. Diese Entscheidungsfindungen beeinflussen die Zielformationsfindung des Kollektivs und

sind mit bestimmten mathematischen Beschreibungsmitteln assoziiert. Diese sind vornehmlich diejenigen der Interaktionsmodellierung sowie der ortsdiskreten Umgebungsmodellierung, da Interaktionen in ereignisdiskreter Form modelliert werden können, wenn gleichzeitig eine entsprechende ortsdiskrete Modellierung der Umgebung zugrunde liegt und Interaktionen von Umgebungsbedingungen abhängig sind. Zur Erfüllung kontinuierlicher Regelungsfunktionen können klassische Regelungsverfahren zur Stabilisierung der fahrzeugagentenseitigen Zustandsgrößen eingesetzt werden. Diese bedingen jedoch die Generierung von Sollgrößen in Form einer Trajektoriengenerierung, die hierbei insbesondere mit der Subfunktion der Kollisionsvermeidung zu versehen ist. Diese Trajektoriengenerierung bedingt gleichzeitig eine Entscheidungsfindung, da eine solche im Hinblick auf die Zielformation festlegt, welche Interaktionen durchzuführen sind. Die Trajektorien können somit als ein Ergebnis einzelner konsekutiver Interaktionen angesehen werden, die durch eine Entscheidungsfindung ermittelt wurden. Desweiteren ist die Funktion der Trajektoriengenerierung mit der Formationsregelung der Kollektivfunktion zu assoziieren, da die Trajektorien in Konsistenz zu anderen Agenten zu erzeugen sind, insbesondere unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung.

3.4.2 Auswahl geeigneter Beschreibungsmittel zur Modellierung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs

Bei Betrachtung der hier durchgeführten Klassifikation der Beschreibungsmittel fällt auf, dass diese häufig nur einzelnen Merkmalen oder Metamerkmale zuzuordnen sind und nur wenige über mehrere Bereiche der Eigenschaften und Merkmale einer kooperativen Regelung eingesetzt werden können. Die Modellierung mittels Petrinetzen erscheint hier als Ausnahme, da hiermit eine ortsdiskrete Modellierung genauso wie auch die Modellierung von Interaktionen und Entscheidungen oder ereignisdiskreter Kommunikation möglich ist. Ähnlich ist dies auch bei den Konsensalgorithmen gelagert. Sie nutzen die graphenbasierte Modellierung der Kommunikationstopologie, die genutzt werden kann, um Formationsregelungen mittels *Interaktionen* (Definition nach Spanos [139]) zu realisieren, wie z. B. in [105] oder [118].

Eine weitere Differenzierung ergibt sich, wenn aus den in Abbildung 3.2 definierten Merkmalen und Metamerkmale anwendungsbezogene Auswahlkriterien bezüglich der Fähigkeiten eines Beschreibungsmittels abgeleitet werden, welche die in

Abschnitt 2.2.1 dargestellten Ziele berücksichtigen. Nachfolgend werden die Auswahlkriterien definiert:

Umgebungsmodellierung bezeichnet die Fähigkeit eines Beschreibungsmittels, Umgebungsbedingungen des Autobahnverkehrs hinreichend abzubilden. Hierzu zählt insbesondere die Fähigkeit folgende Umgebungsbedingungen abzubilden: Fahrstreifenbegrenzungen, Fahrstreifen, Fahrstreifenerweiterungen und -verengungen sowie Auf- und Abfahrten. Bei verteilten Optimierungsverfahren käme es durch die zusätzlichen Randbedingungen des beschränkten Raumes zu Nebenbedingungen, die das Optimierungsproblem nur numerisch und mit wahrscheinlich hohem Aufwand lösen lassen.

Kommunikationsmodellierung bezeichnet die Fähigkeit eines Beschreibungsmittels, die variierende Kommunikationstopologie zwischen den Fahrzeugagenten hinreichend abzubilden sowie die Fähigkeit, Kommunikationsrestriktionen wie Latenzzeiten und Datenverlust implizit zu berücksichtigen.

Entscheidungsfindung bezeichnet die Fähigkeit eines Beschreibungsmittels und der damit assoziierten Methoden, modellbasiert in Abhängigkeit von der Umgebung Regeln für ein definiertes, zielgerichtetes Verhalten eines einzelnen Fahrzeugagenten herzuleiten und abzubilden.

Formationsregelung bezeichnet die Fähigkeit eines Beschreibungsmittels und der damit assoziierten Methoden, Fahrzeugagenten durch einen lokalen Algorithmus in die Lage zu versetzen, definierte Abstände zu anderen Fahrzeugagenten einzuhalten, und zwar mittels der Funktionen „Kommunikation“ und „Perzeption“.

Attribuierung von Agenten bezeichnet die Fähigkeit eines Beschreibungsmittels, Agenten mit definierten Attributen und Intentionen versehen zu können und diese der Entscheidungsfindung zugänglich zu machen.

Tabelle 3.1 bewertet die in Abbildung 3.2 dargestellten Beschreibungsmittel und assoziierten Methoden bezüglich dieser Kriterien mittels des Symbols „+“, sofern die Methode das Kriterium erfüllt und mit dem Symbol „–“, falls dies nicht der Fall ist. Die Symbolik „+–“ bezeichnet hier zwar, dass die Methode zur Erfüllung des jeweiligen Kriterium herangezogen werden könnte, dies jedoch nur unter Einschränkungen

oder erhöhtem Aufwand möglich erscheint. Das ist zum einem bei der hypothetischen Nutzung von Graphen zur Umgebungsmodellierung, zum andern bei Zellulautomaten und dem Kriterium der Entscheidungsfindung der Fall. Zwar können Graphen prinzipiell zur ortsdiskreten Umgebungsmodellierung herangezogen werden, ebenfalls können sie als ein Automatenmodell herangezogen werden, um agentenseitige Entscheidungsfindung abzubilden. Jedoch bieten diese Automaten nicht die Möglichkeit, nebenläufige Prozesse bzw. agentenseitige Aktionen, wie sie im Straßenverkehr vorkommen, hinreichend abzubilden. Petrinetze hingegen verfügen inhärent über diese Eigenschaft. Zellularautomaten dienen ebenfalls der räumlich diskreten Modellierung dynamischer Systeme, wobei die Zellzustände von den Eigenschaften der Nachbarschaftszellen abhängen. Sie bieten jedoch keine Möglichkeit, modellbasiert Entscheidungen von Agenten herzuleiten, sondern können nur dazu dienen, statische Entscheidungsprozesse wie die Anpassung der Geschwindigkeit zu simulieren, wie es beim Nagel-Schreckenberg-Modell der Fall ist [100].

Tabelle 3.1: Qualitative Beurteilung von Beschreibungsmitteln zur kooperativen Regelung im Straßenverkehr

Beschreibungsmittel \ Kriterien	Umgebungsmodellierung	Kommunikationsmodellierung	Entscheidungsfindung	Formationsregelung	Attribuierung von Agenten
Potentialfelder	+	–	–	+	–
Energiefunktionen	–	+	–	+	–
Kopplungskräfte	+	–	–	+	–
Zellularautomaten	+	–	+-	–	–
Bayes-Netze	–	–	+	–	–
Markoff-Ketten	–	–	+	–	–
Graphen	+-	+	+-	–	–
Konsens-Algorithmen	–	+-	–	+	–
Petrinetze	+	+	+	–	+

Für ein zu nutzendes Beschreibungsmittel ist zu fordern, dass alle hier definierten Kriterien zu erfüllen sind. Bei der Formulierung neuer Ansätze ist die Betrachtung der Vorzüge bestehender Beschreibungsmittel und deren assoziierter Methoden sinnvoll, sodass ein neuer Ansatz darin bestehen kann, bestehende Verfahren zu kombinieren. Aus Tabelle 3.1 ist ersichtlich, dass sich Graphen, d. h. Kommunikationsgraphen und mit diesen verknüpft Konsens-Algorithmen sowie Petrinetze bezüglich der Kriterien ergänzen. Daher soll im Folgenden als neuer Ansatz zur Realisierung einer kooperativen Regelung für den Straßenverkehr die Modellierung mittels Petrinetzen und Kommunikationsgraphen formuliert werden. Hierdurch wird es ermöglicht, mittels Konsens-Algorithmen als Regelungsverfahren, das auf Kommunikationsgraphen basiert, kontinuierlich stabilisierte Formationen unter Berücksichtigung von Störungen des Kommunikationsnetzwerks zu erzeugen. Die Umgebungsmodellierung und darauf basierend die Modellierung ereignisdiskreter Interaktionen werden durch einen bestimmten Typus von Petrinetzen, den Objektsystemen, vorgenommen, sodass sich mittels Netzanalyse diskrete Entscheidungsmechanismen für Verkehrssituationen herleiten lassen.

3.5 Fazit zum Stand der Forschung und zur Auswahl der Beschreibungsmittel

Hinsichtlich des Stands der Forschung wurden die Bereiche der Forschungsprojekte mit dem Fokus der Verkehrsverbesserung und der kooperativen Regelungsverfahren identifiziert. Es wurde aufgezeigt, wo die vorliegende Arbeit hinsichtlich der Regelungsziele und der Regelungsfunktionen (Entscheidungsgenerierung) im Kontext bestehender Projekte der Verkehrsbeeinflussung anzusiedeln ist. Sie besitzt insofern ein Alleinstellungsmerkmal, als mit verteilten Regelungsressourcen und mit kooperativen Entscheidungsmechanismen, globale Regelungsziele und gleichzeitig lokale Regelungsziele wie die Kollisionsvermeidung verfolgt werden.

Auf Grundlage der Darstellung des Stands der Forschung zu kooperativen Regelungsverfahren konnte eine Klassifikation der jeweils verwendeten Beschreibungsmittel vorgenommen werden. Diese Klassifikation diene im Folgenden dazu, Kriterien für die zu wählenden Beschreibungsmittel zu formulieren und diese zu beurteilen. Dies führte zur Wahl von Kommunikationsgraphen, Konsens-Algorithmen und Petrinetzen als Beschreibungsmittel. Die Kommunikationsgraphen dienen dazu, den

Datenaustausch zwischen Fahrzeugagenten zu modellieren, während Petrinetze dazu dienen, die Umgebung und ereignisdiskrete Interaktionen zwischen Fahrzeugagenten abzubilden. Ein geeigneter Konsens-Algorithmus beschreibt den Datenaustausch zwischen den Fahrzeugagenten und darauf basierend die Veränderung von fahrzeuglokalen Informationsvariablen für eine kooperative Regelungsfunktion, die es ermöglicht Formationen zu stabil zu regeln und Kollisionen zwischen Fahrzeugen zu vermeiden. Die Analyse von Petrinetzen kann im Folgenden genutzt werden, um fahrzeuglokale deterministische Entscheidungsmechanismen zu ermitteln.

Die folgenden Kapitel widmen sich der Umsetzung der Modellierung und der Ermittlung dieser fahrzeugagentenseitigen kooperativen Regelungsfunktionen, d. h. Formationsregelung und ereignisdiskreter Entscheidungsmechanismen. In Kapitel 4 wird die Verhaltensmodellierung von Fahrzeugagenten mit Petrinetzen und Kommunikationsgraphen ausgeführt, während Kapitel 5 sich der konkreten Ermittlung der (Regelungs-)Funktion der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten durch eine Regelbasis und Konsens-Algorithmen widmet.

Eine gute wissenschaftliche Theorie
sollte einer Bardame erklärbar sein.

Ernest Rutherford

Kapitel 4

Verhaltensmodellierung

Nach der Vorstellung des Fahrzeugagentenkonzepts in Kapitel 2 und der Wahl von Petrinetzen und Kommunikationsgraphen als Beschreibungsmittel in Kapitel 3, soll in diesem Kapitel die Verhaltensmodellierung von Fahrzeugagenten in Verkehrssituationen vorgenommen werden. Dies geschieht zu dem Zweck, die Funktion der Handlungsanweisung eines Fahrzeugagenten hinsichtlich seiner Ziele durch die Ermittlung einer Regelbasis und einer kooperativen Regelung algorithmisch zu realisieren. Das Kapitel strukturiert sich daher in eine Einführung in das Beschreibungsmittel der Petrinetze, gefolgt mit der spezifischen Attributierung der Petrinetzkonstituenten für den Autobahnverkehr. Danach wird gezeigt wie Verkehrssituationen mit der eingeführten Art der Petrinetze modelliert werden können. Das Kapitel schließt mit der Darstellung zur Kommunikationsmodellierung mittels Graphen, die dazu dienen soll, im folgenden Kapitel 5 eine kooperative Formationsregelung zu entwerfen.

4.1 Modellbildungskonzept auf Basis von Petrinetzen

Bevor die für die Modellierung von ereignisdiskreten Vorgängen notwendige, grundsätzliche Einführung in die Petrinetze vorgenommen und später auf die Anwendungsdomäne bezogen wird, soll zunächst das grundsätzliche Konzept zur Modellbildung anschaulich erläutert werden. Hierdurch erlangt man einen recht intuitiven Zugang einerseits zur Petrinetzsymbolik, andererseits zur Modellierung von Verkehrsabläufen auf Autobahnen. Eine Übersicht über das hier verfolgte Modellierungskonzept zeigt Abbildung 4.1.

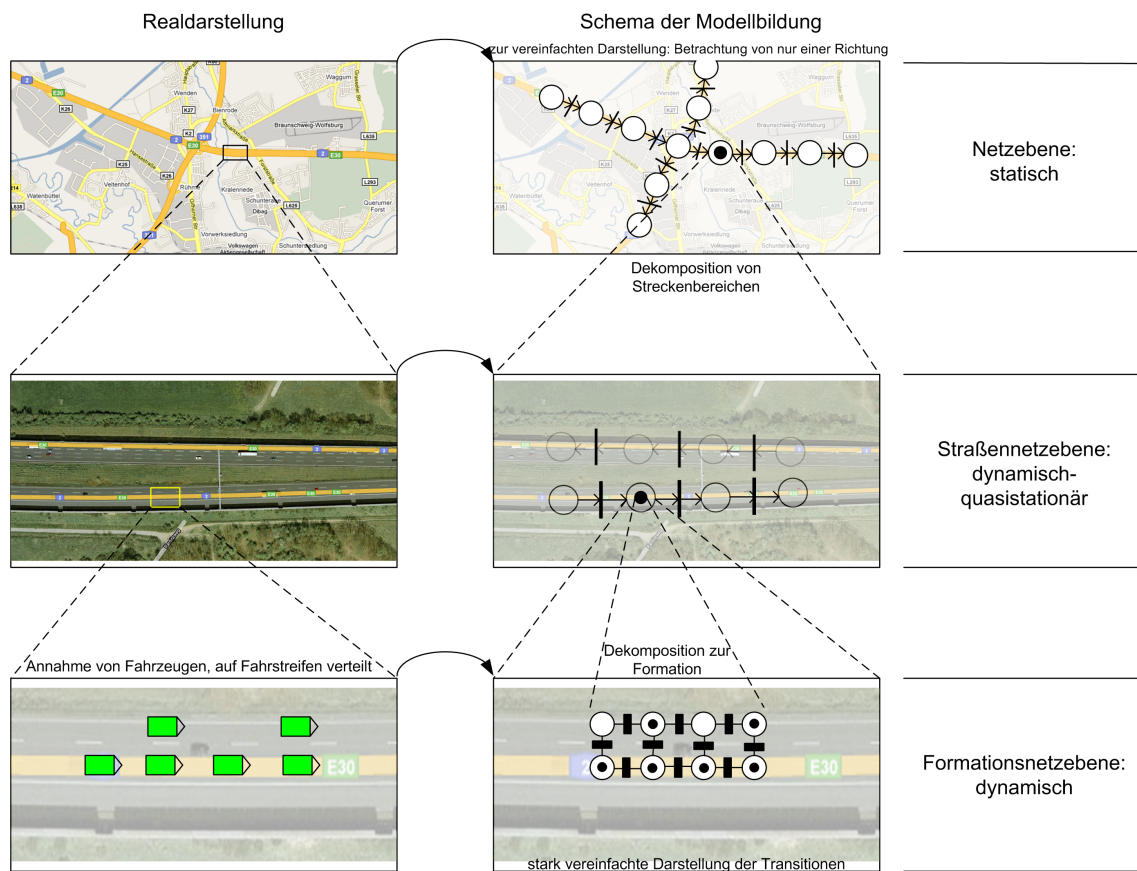


Abbildung 4.1: Prinzip der Modellbildung des Autobahnverkehrs mit Petrinetzkomp-
ponenten

Dort sind drei Ebenen des Autobahnverkehrs dargestellt. Diese Ebenen sind zum einen in der linken Spalte in einer symbolischen Realdarstellung abgebildet und zum anderen, in der rechten Spalte, schematisch als Petrinetze modelliert. Die dargestellten Modellierungsebenen unterscheiden sich durch den jeweiligen Detaillierungsgrad im Straßenverkehr. So betrifft die oberste *Netzebene* das Autobahnstraßennetz selbst, das auf der Seite der Modellierung in einzelne feste, d. h. in räumlicher Ausdehnung konstante Segmente unterteilt werden kann (vgl. Abbildung 4.1 rechts oben). Diese Segmentierung entspricht einer räumlichen Diskretisierung des realen Straßennetzes, die in eine Notation mit den Symbolen der Petrinetze übertragen werden kann. Diese Diskretisierung wird zum einen durch die Festlegung auf das Beschreibungsmittel der Petrinetze induziert, zum anderen stellt sich bei der übergeordneten Betrachtung des Verkehrs häufig die Frage nach aggregierten Verkehrsgrößen auf definierten Streckenabschnitten, deren Beantwortung durch diese Art der Modellierung ermöglicht wird. So entspricht das betrachtete Autobahnsegment einer Stelle in der Petrinetznotation. Einzelne Segmente können nun von Fahrzeugen belegt sein, was durch eine Marke (Token) symbolisiert wird, welche die betreffende Stelle besetzt. Der Übergang dieser Marke zu sich anschließenden Stellen wird durch Transitionen modelliert, die mittels gerichteter Kanten (Bögen) mit Stellen verknüpft werden. Die Richtung der Kanten entspricht der Richtung des Verkehrsflusses. Durch Anwendung des Dekompositionsprinzips können nun die anderen Modellierungsebenen entsprechend abgebildet werden. Beim betrachteten Autobahnsegment werden auf der darunter befindlichen Detaillierungsebene in der Realdarstellung die einzelnen Fahrbahnen und Fahrstreifen erkennbar. Entsprechend werden diese Fahrbahnen aufgrund der in der Realität vorhandenen räumlichen Trennung als zwei getrennte Petrinetze modelliert. Auch hier werden in diesem als *Straßennetzebene* bezeichneten Detaillierungsgrad bestimmte Raumsegmente als Stellen definiert und diese mittels Transitionen und Kanten untereinander verknüpft.

Gruppen von Fahrzeugen werden ebenfalls mit einer Marke in dem betreffenden Aufenthaltsraum modelliert. Der wesentliche Unterschied zu der darüber liegenden Netzebene besteht darin, dass die modellierten Fahrbahnsegmente in ihrer räumlichen Ausdehnung nicht konstant sind. Sie sind in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeiten und der Fahrzeugformation, die in den dortigen Markenattributen kodiert sind, variabel und für den jeweiligen Fall der fahrzeugseitig durchzuführenden Interaktion als quasistationär anzusehen. Zudem werden in den Transitionen –

wie später aufgezeigt wird – bestimmte Eigenschaften des Straßenverlaufs, wie z. B. eine Ab- oder Auffahrt, kodiert, sodass hierdurch eine Verknüpfung zur untersten, fahrzeuglokalen Modellierungsebene hergestellt wird. Diese Ebene wird aufgrund der Abbildung von Fahrzeugformationen *Formationsnetzebene* genannt und bildet das ereignisdiskrete dynamische Verhalten der Fahrzeuge untereinander ab. Diese Modellebene wird durch die Dekomposition einer Marke auf der Flussebene in ein eigenes Petrinetz erzeugt, das im Weiteren als Formationsnetz bezeichnet wird. Das Formationsnetz modelliert diskrete Aufenthaltsräume für Fahrzeuge auf den jeweiligen Fahrstreifen als Stellen. Ein Fahrzeug entspricht hier genau einem Token. Die Transitionen des Formationsnetzes modellieren die möglichen Interaktionen der Fahrzeuge, die hier auf Fahrstreifenwechsel nach links und rechts sowie das Anpassen der Längsposition eingeschränkt werden.

Es lassen sich hierzu die folgenden grundsätzlichen Definitionen vornehmen:

Definition 4.1 (Grundsätzliche Beschreibung eines Straßennetzes). Petrinetze, welche die Autobahn in ihren Fahrbahnen, Straßenabschnitten und Fahrstreifen modellieren, heißen *Straßennetz*.

Definition 4.2 (Grundsätzliche Beschreibung eines Formationsnetzes). Petrinetze, welche Fahrzeugformationen durch mögliche Aufenthaltsräume für Fahrzeuge und deren Interaktionen modellieren, heißen *Formationsnetz*. Sie sind als Token in ein Straßennetz eingebettet.

Es sei angemerkt, dass das hier skizzierte Schema strukturelle Ähnlichkeiten zur Modellierung mittels sog. *Situations-Operator-Modellen (SOM)* aufweist, die von Söffker zur Modellierung von Mensch-Maschine-Interaktionen eingeführt wurden [138]. In [48, S. 48] werden diese Ähnlichkeiten explizit aufgeführt, indem eine Stelle eines Petrinetzes dem Begriff einer Situation sowie eine Transition dem Begriff eines Operators in SOM-Notation entspricht. Es wird dort die SOM-Modellierung benutzt, um restrukturierende Modelle zu erzeugen, die mittels farbigen Netzen realisiert werden. In vorliegender Arbeit wird unabhängig hiervon zu diesem Zweck auf Objektsysteme nach Valk [145] zurückgegriffen.

Nach dem beschriebenen Schema wird in den folgenden Abschnitten die Modellierung des Autobahnverkehrs vorgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die Fluss- und die Clusterebene betrachtet. Hierzu wird zunächst eine Einführung in die formale Darstellung der Petrinetze gegeben, woran sich die Attri-

buierung der Petrinetzkomponenten pro Betrachtungsebene anschließt. Da ein koordiniertes Verhalten der Fahrzeuge einen Datenaustausch zwischen diesen bedingt, wird nach der beschriebenen Modellierung in Petrinetzen auch die Modellierung des Kommunikationsnetzes beschrieben, und zwar mit dem Fokus auf die später zu nutzenden Konsens-Algorithmen.

4.2 Grundlagen der Petrinetzbeschreibung

4.2.1 Formale Definition, Dynamik und Erreichbarkeit

Bevor auf die konkrete Attribuierung der petrinetzbasierten Modellierung unter dem Anwendungsbezug des Autobahnverkehrs eingegangen wird, soll eingangs eine kurze formale Definition der Petrinetze gegeben werden, und zwar in Anlehnung an die Standardliteratur wie z. B. [8]. Die graphischen Konstituenten eines Petrinetzes sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Stellen definieren diskrete Zustände des zu modellierenden Systems, Transitionen hingegen Zustandsübergänge. Ist ein Zustand, d.h. eine Stelle, des Netzes aktiv, so ist dieser mit einer Marke belegt. Kanten verknüpfen Stellen mit Transitionen (und umgekehrt) und induzieren einen gerichteten Markenfluss. Graphentheoretisch handelt es sich bei Petrinetzen um Graphen mit zwei Knotentypen, den Stellen und Transitionen; d.h. Petrinetze sind bipartite Graphen.

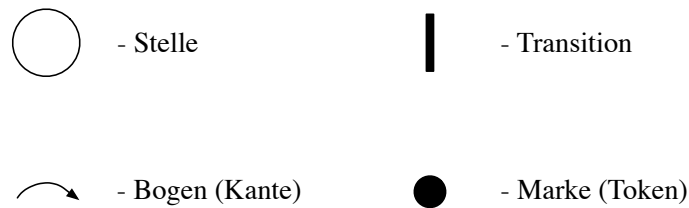


Abbildung 4.2: Konstituenten eines Petrinetzes

Definition 4.3 (Petrinetz – Stellen-Transitionsnetz). Ein Petrinetz (Stellen-Transitionsnetz) PN ist ein Tupel $PN = \{S, T, F, K, W, \mathbf{m}\}$ mit $S = \{s_1, \dots, s_i\}$ als nichtleere endliche Menge aller Stellen eines Systems und $T = \{t_1, \dots, t_i\}$ einer nichtleeren endlichen Menge von Transitionen (aktive Netzknoten) eines Systems. Die Mengen S und T sind disjunkt. F bezeichnet die Flussrelation als Teilmenge der Vereinigung der Verknüpfung aller Stellen mit allen Transitionen und aller Transitionen mit allen Stellen

durch $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$. Es existieren keine Verknüpfungen von Stellen mit Stellen und Transitionen mit Transitionen, sodass $F \cap (S \times S) = \emptyset$ und $F \cap (T \times T) = \emptyset$ gilt. K ordnet jeder Stelle eine Kapazität zu mit $K : S \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\}$. W ordnet jeder Kante des Petrinetzes ein Kantengewicht zu mit $W : F \rightarrow \mathbb{R}^+$. Der Markierungsvektor $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_i]$ ordnet jeder Stelle eine ganzzahlige Markierung (Token- oder Markenanzahl) zu.

Definition 4.4 (Eingangsknoten). Die Menge aller Eingangsknoten ist definiert als $\bullet x = \{y \mid (y, x) \in F\}$.

Definition 4.5 (Ausgangsknoten). Die Menge aller Ausgangsknoten ist definiert als

$$x\bullet = \{y \mid (x, y) \in F\}.$$

Damit ein Markenfluss von einer Stelle vor der betreffenden Transition auf eine Stelle nach dieser möglich ist, muss die betreffende Transition aktiviert, respektive in Konzession sein.

Definition 4.6 (Aktivierte Transition). Eine Transition t ist in Konzession, bzw. heißt aktiviert, wenn beides erfüllt ist:

$$\forall s \in \bullet t : m(s) \geq W(s, t) \quad (4.1)$$

$$\forall s \in t\bullet : m(s) \leq K(s) - W(s, t) \quad (4.2)$$

Ist eine Transition t aktiviert, kann diese geschaltet werden und führt zu einer Folgemarkierung \mathbf{m}' , gemäß Gleichung 4.3.

$$m'(s) = \begin{cases} m(s) - W(s, t) & \text{falls } s \in \bullet t \setminus t\bullet, \\ m(s) + W(s, t) & \text{falls } s \in t\bullet \setminus \bullet t, \\ m(s) - W(s, t) + W(s, t) & \text{falls } s \in t\bullet \cap \bullet t, \\ m(s) & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.3)$$

Definition 4.7 (Schrittsequenz). Eine endliche Folge an Schaltungen von Transitionen $\sigma = [t_1, \dots, t_n]$ mit $t_i \in T$ heißt eine in \mathbf{m} aktivierte nebenläufige Schrittsequenz mit der Folgemarkierung \mathbf{m}' , falls ein gerichteter Pfad existiert, sodass $\mathbf{m} \xrightarrow{\sigma} \mathbf{m}'$ gilt.

Um die Dynamik des Netzes algebraisch abzubilden und letztlich die Folgemarkierungen berechnen zu können, dient die sog. Inzidenzmatrix. Sie ergibt sich direkt aus den Kantengewichten der Stellen zu Transitionen und Transitionen zu Stellen.

Definition 4.8 (Inzidenzmatrix). Sei PN ein Petrinetz (Stellen-Transitionsnetz). Die zu PN gehörige Postmatrix \mathbf{C}_{post} enthält die Kantengewichte W aller Stellen zu den Transitionen. Die zugehörige Prematrix \mathbf{C}_{pre} enthält die Kantengewichte aller Transitionen zu den Stellen. Sie sind durch $P \times T$ indizierte Matrizen. Die Inzidenzmatrix des Netzes PN ist definiert durch: $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\text{post}} - \mathbf{C}_{\text{pre}}$.

Hiermit lässt sich die Gleichung 4.3 abkürzen zu Gleichung 4.4, wobei die Betrachtung der einzelnen Stellen aus Gleichung 4.3 nicht mehr nötig wird, da sie durch stellenindizierte Vektoren ersetzt wird. So bezeichnet \mathbf{m} den aktuellen Markierungsvektor, \mathbf{t} den Transitionsvektor mit der Häufigkeit zu schaltender Transitionen, die notwendigerweise in Konzession sind, und \mathbf{m}' den Markierungsvektor nach Schalten der Transitionen.

$$\mathbf{m}' = \mathbf{C} \cdot \mathbf{t} + \mathbf{m} \quad (4.4)$$

Durch die rekursive Anwendung von Gleichung 4.4 lassen sich alle erreichbaren Markierungen berechnen. Hierzu ist es notwendig, eine Schaltregel zu definieren, die spezifiziert in welchen Fällen eine Transition schalten darf. Denn es können mehrere Transitionen in Konzession sein, sodass es prinzipiell auch möglich ist, dass mehrere oder gar alle Transitionen gleichzeitig schalten können. Hier gilt es, die Spezifikation am Anwendungsfall zu orientieren. Prinzipiell ist es im Sinne der Petrinetzrepräsentation des Straßenverkehrs möglich, dass zwei oder mehr Ereignisse nebenläufig stattfinden. Dies ist z. B. der Fall bei zwei Fahrzeugen, die nebenläufig einen Aufholvorgang oder einen Fahrstreifenwechsel vornehmen. Jedoch existiert in der Petrinetzrepräsentation die Zeit nicht explizit, sondern sie wird durch kausale konsekutive Ereignisse ersetzt. Dies gilt nicht beim Formalismus mit zeitlich attribuierten Transitionen, der hier unberücksichtigt bleiben soll. Und in diesem Sinne existiert in der Petrinetzrepräsentation keine Gleichzeitigkeit, weshalb als Schaltregel festgelegt wird, dass stets nur eine Transition schalten kann. An den erreichbaren Markierungen ändert diese Festlegung nichts, da sie die Struktur des Petrinetzes nicht berührt.

Definition 4.9 (Erreichbarkeitsgraph). Die erreichbaren Markierungen können im *Erreichbarkeitsgraphen* abgebildet werden. Er beschreibt ausgehend von einer Anfangsmarkierung die Globalzustände des als Petrinetz modellierten Systems und modelliert deren Zustandsübergänge als Kanten, die mit der jeweils geschalteten Transition attribuiert sind. Der Erreichbarkeitsgraph EG zu einem Petrinetz PN ist gegeben durch

$$EG = \{RM, T_{EG}\} \quad (4.5)$$

mit RM der Menge der erreichbaren Markierungen gem. Gleichung 4.4 und T_{EG} der Menge der Kanten zwischen den erreichbaren Markierungen, die mit den Bezeichnungen der jeweilig geschalteten Transition attribuiert sind. Die Menge T_{EG} hat die Eigenschaft

$$T_{EG} \subseteq RM \times \mathcal{P}(T) \times RM \quad (4.6)$$

wobei $\mathcal{P}(T)$ die Potenzmenge von T bezeichnet.

4.2.2 Netztransformationen und Objektnetze

Eingangs dieses Kapitels wurden anhand des Modellierungsschemas aus Abbildung 4.1 bereits durch Einführung der einzelnen Modellierungsebenen Netztransformationen eingeführt. Die für diese Arbeit notwendigen Netztransformationen sollen hier formal kurz beschrieben werden, sodass auf dieser Basis im folgenden Abschnitt die Attribuierung entsprechend der Anwendungsdomäne erfolgen kann. Eine vollständige Übersicht zu Netztransformationen findet sich in [8].

Komposition und Dekomposition. Bei der Komposition wird ein transitionsberandetes Teilnetz durch eine Transition oder ein stellenberandetes Teilnetz durch eine Stelle ersetzt. Dies ist z. B. bei den Straßensegmenten in Abbildung 4.1 der Fall. Damit wird lokal eine Abstraktion vorgenommen, sodass eine Gruppe von Zuständen und Zustandsänderungen nur noch den Charakter eines Zustands oder den einer Zustandsänderung besitzt. Die Definition sei hier ausschließlich für stellenberandete Kompositionen gegeben. Für die transitionsberandete Komposition ergibt sich dies analog.

Definition 4.10 (Stellenberandete Komposition). Sei $PN = S, T, F$ ein Petrinetz, $PN' = S', T', F'$ ein stellenberandetes Teilnetz von PN und $s_{PN'} \notin S \cup T$ die Stelle,

die PN' ersetzen soll, so gilt für alle Knoten $(x,y) \in F \setminus F'$

$$\varphi(x,y) = \begin{cases} (x,y) & \text{wenn } x,y \in s \cup t \setminus s' \cup t' \\ (x, s_{PN'}) & \text{wenn } y \in \text{Rand}(PN') \\ (s_{PN'}, y) & \text{wenn } x \in \text{Rand}(PN') \end{cases} \quad (4.7)$$

Der Operator φ ersetzt Elemente des Randes von PN' durch die Stelle $s_{PN'}$. Es ergibt sich hiermit ein neues Petrinetz $PN'' = \{S'', T'', F''\}$ mit $S'' = (S \setminus S') \cup s_{PN'}$, $T'' = \{T \setminus T'\}$ und $F'' = \varphi(F \setminus F')$.

Die Dekomposition bezeichnet das Gegenteil der Komposition. Eine Stelle wird durch ein stellenberandetes Teilnetz ersetzt. Auf eine formale Definition, auch für transitionsberandete Dekompositionen, wird hier verzichtet. In Abbildung 4.3 sind die Komposition und Dekomposition visualisiert.

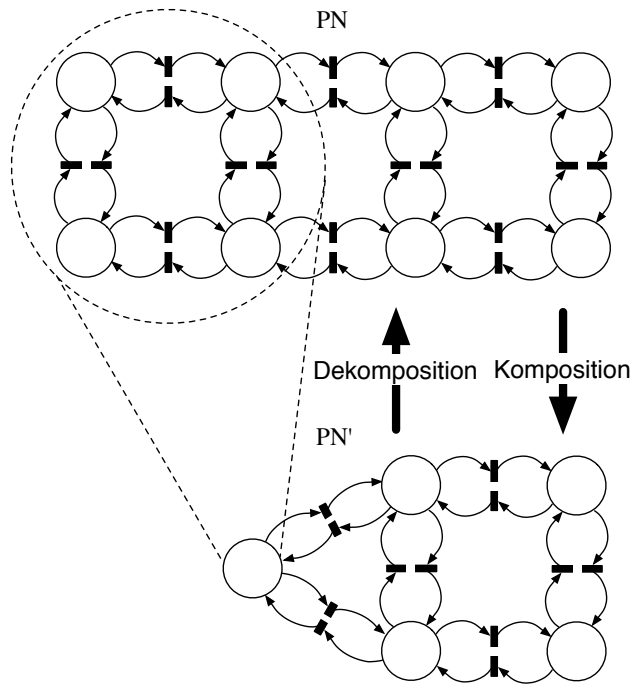


Abbildung 4.3: Prinzipskizze zur stellenumrandeten Komposition und Dekomposition

Einbettung und Restriktion bezeichnen die Möglichkeiten der Erweiterung eines Netzes durch Knoten und Kanten, bzw. bei Letzterem das gezielte Entfernen von diesen. Wie sich später zeigen wird, ermöglicht dies die Modellierung von Fahrstreifenerweiterung und -verengung.

Definition 4.11 (Einbettung). Sei $PN' = \{S', T', F'\}$ und $PN = \{S, T, F\}$ ein Obernetz von PN' , so ist die Einbettung ψ von PN' in PN definiert als folgende Abbildung:

$$\psi : \begin{cases} S \cup T \rightarrow S' \cup T' \\ x \mapsto x \end{cases} \quad (4.8)$$

Die Umkehrung hiervon wird als Restriktion bezeichnet; sie beschneidet das ursprüngliche Netz zu einem Teilnetz. Abbildung 4.4 visualisiert dies anhand eines einfachen Beispielnetzes.

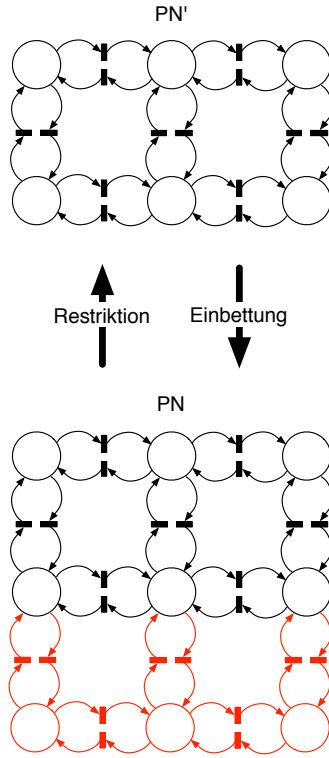


Abbildung 4.4: Prinzipskizze zu Restriktion und Einbettung

Tokendekomposition als neuartiges Objektnetz. Wie bereits im Modellierungsschema der Abbildung 4.1 angedeutet, soll eine Fahrzeugformation als ein *Metatoken* abgebildet werden, der sich in einem übergeordneten Netz, das die Umgebung modelliert, fortbewegt. Dieser Ansatz von *Netzen in Netzen* wurde bereits von Valk in [145] unter der Bezeichnung *Objektnetze* formal eingeführt. Diese ermöglichen über die regulären bisher eingeführten Petrinetze hinaus die Modellierung der

Zustandsänderungen von sich in Petrinetzen fortbewegenden Objekten, die ebenfalls als Petrinetz repräsentiert werden. In [145] wird beispielhaft ein Fabrikationsprozess als Petrinetz modelliert, wobei dort die zu bearbeitenden Teile als eigene Petrinetze modelliert werden. Der Fabrikationsprozess stellt dort ein übergeordnetes Petrinetz dar, in welchem sich die Netze der bearbeiteten Teile fortbewegen und deren Status sich in Abhängigkeit der Ereignisse in dem übergeordneten Petrinetz ändern. Es existieren also laut Valk zwei Netztypen: das *Systemnetz* und die *Objektnetze*, welche die Metatoken des Systemnetzes darstellen. Gleichzeitig besteht zwischen diesen Netzen eine sog. Interaktionsrelation ρ .

Definition 4.12 (Objektsystem). Ein Objektsystem ist ein Tupel $OS = (SN, ON, \rho)$ mit

- $SN = (S, T, F, K, \mathbf{m}_0)$ heißt Systemnetz mit der Anfangsmarkierung \mathbf{m}_0
- $ON = (S', T', F', K', \mathbf{m}'_0)$ heißt Objektnetz mit der Anfangsmarkierung \mathbf{m}'_0
- ρ heißt die Interaktionsrelation zwischen SN und ON

In [145] wird zum einen definiert, dass das Systemnetz sowie die darin enthaltenen Objektnetze nur Bedingungs-Ereignisnetze sein dürfen, d.h. Stellen-Transitionsnetze, deren Kapazität sämtlicher Stellen und deren Kantengewichte auf den Wert eins eingeschränkt sind. Außerdem ist die Interaktionsrelation dort definiert als $\rho \subseteq T \times T'$. Dies bedeutet, dass ein Ereignis, d.h. das Schalten einer Transition auf Systemnetzebene, das Schalten einer Transition auf Objektnetzebene induziert. Diese recht strikte Relation soll hier zum Zwecke von mehr Modellierungsfreiheit in dieser Form nicht übernommen werden. Stattdessen sollen abstraktere Interaktionen auf Objektnetzebene durch Transitionen auf Systemnetzebene induziert werden können. Hierzu zählen zum einen Rekonfigurationen der Formation, sowie zum anderen – und dies ist eine Erweiterung der klassischen Interaktionsrelation – Topologieänderungen des betreffenden Objektnetzes in Form von Restriktionen und Einbettungen. Hierzu ist es notwendig, auf der Ebene des Systemnetzes unterschiedliche Typen von Transitionen einzuführen, die entsprechende abstrakte Aktionen auf Objektnetzebene hervorrufen. Gleichzeitig ist es notwendig, auch die umgekehrte Wirkrichtung der Interaktionsrelation von Objektnetz zu Systemnetz zuzulassen. Hierdurch können Interaktionen, die auf Objektnetzebene stattfinden, Attribute von Elementen variieren, welche auf Systemnetzebene angesiedelt sind. Diese abstrakten Aktionen sind

vom Anwendungsfall abhängig, sodass diese bei der Attribuierung in Bezug auf den Straßenverkehr genauer erläutert werden.

4.2.3 Erweiterung auf farbige Netze

Die vorgenannten Definitionen zu den Netztransformationen und Objektnetzen stellen sicher, dass nach dem Modellierungsschema die unterschiedlichen Konstituenten des Straßenverkehrs auf Autobahnen hinreichend abgebildet werden können. Da jedoch in Abschnitt 2.2.1 zum einen der Begriff der Fahrzeugklassen eingeführt wurde und zum anderen es aufgrund des Anwendungsfalles sinnvoll ist, die jeweiligen Intentionen von Fahrzeugagenten sowie Zustandsänderungen von Fahrzeugformationen zu unterscheiden, soll dies durch eine Erweiterung auf farbige Petrinetze erfolgen. Bei farbigen Petrinetzen (Colored Petri Nets (CPN)) werden die Token eines Netzes durch unterschiedliche Farben attribuiert und sind somit von einander unterscheidbar. Außerdem wird grundsätzlich die Menge von möglichen Token-Farben pro Stelle explizit definiert. Für jede Transition wird festgelegt, unter welchem Typ und bei welcher Anzahl von Token diese aktiviert ist [81].

Hierzu wird die formale Definition eines Petrinetzes, sowohl bei Objektnetzen als auch bei Systemnetzen, um die sog. Farbfunktion Σ erweitert, die jeder Stelle eine Menge von möglichen Token-Farben und jeder Transition eine Menge von möglichen *Erscheinungsfarben* zuordnet.

Definition 4.13 (Farbiges Objektsystem). Sei $OS = (SN, ON, \rho)$ ein farbiges Objektsystem, so gilt für das zugehörige Systemnetz und die zugehörigen Objektnetze:

- $SN = (\Sigma_{SN}, S, T, F, K, \mathbf{m}_0)$ heißt Systemnetz mit der Anfangsmarkierung \mathbf{m}_0
- $ON = (\Sigma_{ON}, S', T', F', K', \mathbf{m}'_0)$ heißt Objektnetz mit der Anfangsmarkierung \mathbf{m}'_0

Diese Definition entspricht in Anlehnung an [81] der Definition eines CPN, aufgrund der Tatsache, dass hierdurch die Repräsentation des Netzes in Form einer Inzidenzmatrix möglich wird. Eine Flussrelation F ist in dortiger Definition nicht gegeben, sie wird hier jedoch zum Zwecke der Konsistenz mit den vorherigen Definitionen mit einbezogen.

Nachdem die Grundlagen für die Modellierung des Autobahnverkehrs durch die Beschreibung mit Petrinetzen dargestellt wurden, soll nun die detaillierte Attributierung der Netzkomponenten durchgeführt werden.

4.3 Modellierung des Autobahnverkehrs mit Petrinetzen

Im vorherigen Abschnitt wurden die formalen Definitionen von Petrinetzen eingeführt, die notwendig sind, um den Autobahnverkehr zu modellieren. Diese Grundlagen werden im Folgenden genutzt, um den Komponenten eines Netzes in Abhängigkeit der Detaillierungsebene und der Verkehrssituation bestimmte Attribute in der Petrinetzrepräsentation zuzuweisen, die in den später erläuterten Methoden und der Implementierung genutzt werden. Zum Zwecke der Übersichtlichkeit soll diese Zuordnung der Petrinetzkonstituenten zu den realbegrifflichen Verkehrskonstituenten in Form eines UML-Klassendiagramms den formalen Beschreibungen vorangestellt und erläutert werden.

Wie eingangs des Kapitels bereits herausgestellt wurde, soll sich die Modellbildung auf zwei Detaillierungsebenen erstrecken, und zwar auf derjenigen der Autobahn, sowie auf der Ebene der Fahrzeugformationen. Die Fahrzeugformationen sollen hierbei auch in der Repräsentation als Petrinetz in einzelne Segmente eines Fahrstreifenabschnitts eingebettet sein, d.h. als *Metatoken*. Wendet man nun die Definitionen des vorherigen Abschnittes zusammen mit den Definitionen 4.1 und 4.2 an, so lässt sich die Detaillierungsebene des Autobahnabschnitts als *Systemnetz* auffassen, während diejenige der Fahrzeugformationen die *Objektnetze* darstellen. Dies ist in den folgenden Definitionen festgelegt.

Definition 4.14 (Straßennetz als Systemnetz). Ein *Straßennetz* ist vom Typ eines *Systemnetzes*.

Definition 4.15 (Formationsnetz als Objektnetz). Ein *Formationsnetz* ist vom Typ eines *Objektnetzes*.

Unter Anwendung der Definitionen 4.14 und 4.15 lässt sich das Klassendiagramm von Abbildung 4.5 interpretieren. Grundsätzlich lassen sich dort drei Teile unterscheiden: Die Konstituenten der Petrinetzmodellierung auf der rechten Seite, die

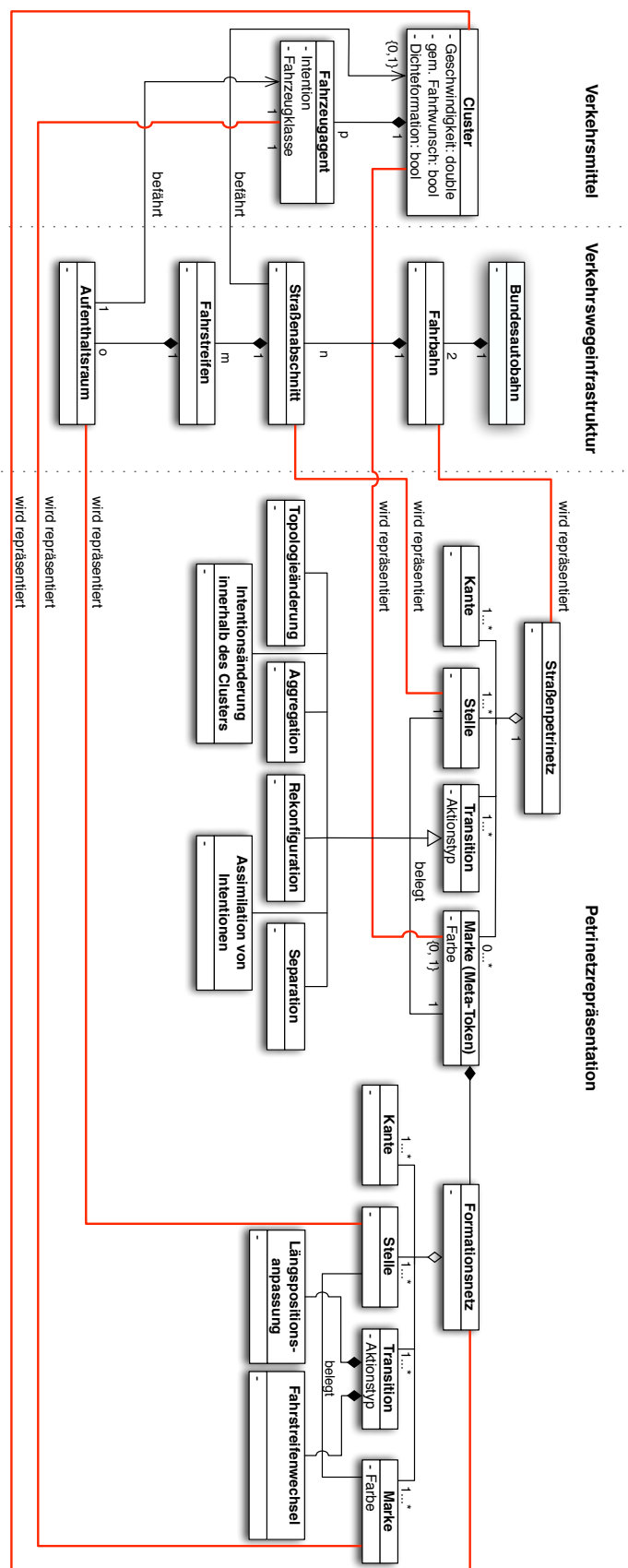


Abbildung 4.5: Zuordnung der Petrinetz- zu Verkehrskonstituenten

Konstituenten der realbegrifflichen Welt der Autobahn im mittleren Bereich und die Elemente, welche die Fahrzeuge betreffen, links außen. Diese sind jeweils miteinander über unterschiedliche Assoziationen verknüpft. Eine Autobahn besteht hiernach aus Fahrbahnen, die jeweils aus einer Anzahl von Straßenabschnitten bestehen. Jeder dieser Straßenabschnitte lässt sich in Fahrstreifen unterteilen. Ein Straßenabschnitt wird nun von einem Cluster bestehend aus einer Anzahl von p Fahrzeugen befahren. Die Attribute eines Clusters sind hierbei seine Geschwindigkeit, sein Fahrtziel und die Angabe über die Erzielung einer Formation maximaler Dichte gem. den Definitionen aus vorherigem Kapitel. Fahrzeugattribute sind die Ego-Geschwindigkeit sowie das Fahrtziel. Die Fahrzeuge befahren Aufenthaltsräume der Fahrstreifen. Die Fahrbahnen werden als Petrinetzmodell der Straße, dem Straßenpetrinetz, abgebildet, mit den dazugehörigen Konstituenten (Kanten, Stellen, Transitionen und Marken). Die Marken dieses Straßennetzes sind selbst Objektnetze bzw. Metatoken, die Formationsnetze abbilden. Diese repräsentieren stets einen gewissen Fahrbahnabschnitt in Abhängigkeit der Größe des dortigen Clusters. Das Formationsnetz selbst stellt wiederum ein Petrinetz dar, bestehend aus Kanten, Stellen, Transitionen und Marken. Die Marken dieses Netzes repräsentieren die Fahrzeuge, eine Stelle entspricht einem realbegrifflichen Aufenthaltsraum.

Die Transitionen des Straßennetzes können außerdem unterschiedliche Aktionen induzieren. Eine Transition kann daher der Polymorphismus einer Topologieänderung des Formationsnetzes (Hinzufügen und Abziehen von Knoten), einer Aggregation (Zusammenfassen mehrerer Formationsnetze in einer Stelle), einer Rekonfiguration der Formation (Änderung der Markierung), einer Assimilation (Angleichen von Intentionen) und einer Separation (Trennen in unterschiedliche Formationsnetze) sein. Mittels dieser grundsätzlichen Aktionen besteht eine Verknüpfung der beiden Modellierungsebenen Straßennetz und Formationsnetz. Die Transitionen des Formationsnetzes hingegen bezeichnen stets nur den Markenfluss von einer zur anderen Stelle, was einer Anpassung der Längsrelativposition bzw. einem Fahrstreifenwechsel entspricht.

4.3.1 Formationsnetz

Unter der Verfolgung des Ziels, eine fahrzeuglokale Regelbasis für ein kooperatives Verkehrsverhalten herzuleiten, werden die obigen Festlegungen nun formal beschrieben und die eingangs eingeführten Definitionen der Stellen-Transitionsnetze kon-

ketisiert bzw. eingeschränkt. Außerdem existieren Bedingungen für diese formale Repräsentation. Eine notwendige Bedingung für ein solches Formationsnetz ist die Existenz eines Clusters. Desweiteren muss für die Repräsentation in Petrinetznotation vorausgesetzt werden, dass eine allen Fahrzeugen gemeinsame, für die jeweilige Formation konstante mittlere Geschwindigkeit existiert. Dann ist das Netz bezüglich der Relativedistanzen quasistationär. Die in der Realität vorliegenden Distanzen sind geschwindigkeitsabhängig, jedoch sind diese für die zu entwerfenden Entscheidungsmechanismen nicht relevant [68]. Für ein Formationsnetz gilt die folgende Definition.

Definition 4.16 (Formationsnetz). Ein *Formationsnetz* ist ein Tupel $\mathcal{F} = PN_F = \{\Sigma_F, S_F, T_F, F_F, K_F, C_F, W_F, \mathbf{m}_F\}$. $r \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ heißt Fahrstreifenanzahl. $o \in \mathbb{N}^+ \setminus 0$ ist die Anzahl der Raumsegmente (Aufenthaltsräume) pro Fahrstreifen.

Pro Token existiert die Menge an Farbsätzen $\Sigma_F = \{\Sigma_1, \Sigma_2, \dots\}$ zur Repräsentation unterschiedlicher Intentionen der Fahrzeuge.

Die Menge S_F entspricht der Menge der Aufenthaltsräume, daher ist die Anzahl aller Aufenthaltsräume gleich der Kardinalität der Stellenmenge mit $|S_F| = r \cdot o$.

Die Menge der Transitionen T_F repräsentiert die Menge an *Interaktionen*, welche jeweils vom Typ einer Längspositionsänderung oder Querpositionsänderung sind, wobei $T_F \subseteq S_F \times S_F$ gilt. Die Anzahl an *Interaktionen* ist gegeben durch die Kardinalität der Transitionsmenge mit $|T_F| = (2r \cdot (o - 1)) + 2((r - 1) \cdot o)$, die der Summe aus der Anzahl der Stellen pro Fahrstreifen multipliziert mit der Anzahl an Fahrstreifen und der Anzahl der Transitionen zwischen den Stellen unterschiedlicher Fahrstreifen entspricht.

Die Flussrelation ist gegeben durch $F_F \subseteq (S_F \times T_F) \cup (T_F \times S_F)$.

Das Netz ist ein stellenumrandetes Petrinetz. Auf eine explizite Modellierung von Interaktionen, die einer Zustandsänderung in diagonalen Richtung entsprechen wird hier verzichtet, da solche als Überlagerung von Interaktionen in Quer- und Längsrichtung interpretiert werden können.

Die Kapazitäten der Stellen sind gegeben durch $K_F : S_F \rightarrow \{0, 1\}$. Die Stellenkapazität ist also für die Auslegung der Regelbasis auf den Wert eins begrenzt, was einer inhärenten Sicherheitsforderung zur Kollisionsvermeidung entspricht.

Die Farbfunktion $C_F : S_F \rightarrow \Sigma_F$ ordnet jeder Stelle mindestens einen Farbsatz zu. Jede Stelle besitzt im Formationsnetz jeden Farbsatz.

Die Kantengewichte sind gegeben durch $W_F : F_F \rightarrow 1$ unabhängig von der Tokenfarbe.

Der Markierungsvektor $\mathbf{m}_F = \{m_{F1}, m_{F2}, \dots\}$, $m_{Fi} \in \{0,1\}$ bezeichnet die Fahrzeugformationen in PN_F . Notwendige Bedingung für die Existenz eines Formationsnetzes ist das Vorhandensein eines Clusters, vgl. Definition 2.5.

Es ergibt sich eine generische Struktur eines Formationsnetzes, die in Abbildung 4.6 dargestellt ist. Stellen sind grundsätzlich mit ihren Nachbarstellen über Transitionen und gerichtete Kanten wechselseitig verknüpft. Zudem ist dort die im Folgenden benutzte Konvention zur Bezeichnung der Stellen angegeben, die sich an einer Matrixstruktur aus Längsposition und Fahrstreifennummer orientiert. Dieses Ordnungsprinzip kann nun genutzt werden, um die Inzidenzmatrix des Netzes aufzubauen. Dies ist notwendig, um automatisiert unterschiedliche Netze mit Anfangsmarkierungen im Rechner zu erzeugen und anschließend Analysen und Simulationen durchzuführen. Zunächst soll für die folgenden Betrachtungen das Vorhandensein eines Farbsatzes ignoriert werden, das Netz also als Bedingungs-Ereignis-Netz betrachtet werden. Die Erweiterung auf unterschiedliche Farbsätze und der zugehörigen Inzidenzmatrix erfolgt im Anschluss.

Die Inzidenzmatrix eines Formationsnetzes, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, wird in zwei Schritten aufgebaut. Der erste besteht darin, die Adjazenzmatrix der Stellen zu betrachten und eine Konvention abzuleiten, diese formal in Abhängigkeit von Fahrstreifenanzahl und maximaler Fahrzeuganzahl eines Fahrstreifens zu erzeugen. Anschließend können aufgrund dieser Adjazenzmatrix durch numerische Zuordnung von Transitionen entsprechende Inzidenzmatrizen \mathbf{C}_{pre} und \mathbf{C}_{post} , vgl. Definition 4.8, für die Vor- bzw. Nachbedingungen aufgestellt werden. Für die vereinfachte Nomenklatur sollen die Stellen nun von links oben beginnend nach rechts unten fortlaufend nummeriert werden, sodass $S_F = \{S_1, S_2, \dots, S_{o,r}\}$ gilt, vgl. Abbildung 4.7.

Definition 4.17 (Stellenadjazenzmatrix). Die *Stellenadjazenzmatrix* ist definiert als die Abbildung $\mathbf{A}_S : S_F \rightarrow S_F$ mit

$$\mathbf{A}_S = (a_{i,j}) \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= 1 && \text{wenn } \exists t \in T_F \text{ so dass } (S_i, t) \in F_F \text{ und } (t, S_j) \in F_F \\ a_{i,j} &= 0 && \text{sonst.} \end{aligned} \quad (4.10)$$

In der Stellenadjazenzmatrix lassen sich Abbildungen der Stellen eines gemeinsamen Fahrstreifens von Abbildungen der Stellen benachbarter Fahrstreifen unterscheiden. Betrachtet man das Netz aus Abbildung 4.7 als Beispiel, so ergibt sich die Stellenadjazenzmatrix, die in Gleichung 4.11 angegeben ist.

$$\mathbf{A}_S = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right] \quad (4.11)$$

Der in Gleichung 4.11 links oben herausgestellte Block der Stellenadjazenzmatrix ist die Abbildung der Stellen $\{S_1, S_2, S_3\}$ auf sich selbst. Sie bezeichnet also eine Submatrix, welche den ersten Fahrstreifen betrifft. Der Block rechts oben bezeichnet hingegen die Abbildung der Mengen $\{S_1, S_2, S_3\} \rightarrow \{S_4, S_5, S_6\}$, d.h. die Abbildung der Stellen des oberen Fahrstreifens auf diejenigen des unteren Fahrstreifens, was einer Einheitsmatrix entspricht. In den unteren beiden Blöcken von \mathbf{A}_S ist es genau umgekehrt. Links unten erscheint die Abbildung $\{S_4, S_5, S_6\} \rightarrow \{S_1, S_2, S_3\}$, rechts unten hingegen die Abbildung der Stellen des unteren Fahrstreifens $\{S_4, S_5, S_6\}$ auf sich selbst. Es handelt sich bei den Abbildungen der Stellen eines Fahrstreifens auf sich selbst sowie bei der Abbildung auf die Stellen des benachbarten Fahrstreifens jeweils um identische Matrizen. Außerdem weist die Abbildung der Stellen auf sich selbst eine ganz bestimmte Struktur auf, die sich in der visuellen Darstellung des Netzes (Abbildung 4.7) wiederfindet.

Zunächst lässt sich feststellen, dass die Haupt- und Nebendiagonalen der Blockmatrizen links oben und rechts unten von \mathbf{A}_S konstant sind. Das heißt, die dortigen Einträge sind ausschließlich abhängig von der Differenz der Indizes i und j . Durch die Verknüpfung der jeweiligen vorherigen bzw. rückwärtigen Stelle im Netz über eine Transition und durch die gewählte Nummerierung der Stellen ergibt sich genau

diese Matrixstruktur für die Abbildung der Stellen eines identischen Fahrstreifens auf sich selbst. Matrizen, deren Einträge nur von der Differenz der Indizes $i - j$ abhängen, d.h. konstante Haupt- und Nebendiagonalen besitzen, heißen Toeplitz-Matrizen. Die Toeplitz-Matrix ist daher schon allein durch Angabe der ersten Zeile und der ersten Spalte vollständig bestimmt.

Dadurch, dass es sich bei den hier erzeugten Toeplitz-Matrizen stets um Abbildungen derselben Menge auf sich selbst handelt, sind diese bereits allein durch die erste Zeile definiert, da erste Zeile und erste Spalte stets identisch sein müssen. Um den Anwendungsbezug herauszustellen, werden diese Matrizen im Folgenden als *Fahrstreifenadjazenzmatrizen* bezeichnet. Diejenigen Blöcke von \mathbf{A}_S , welche die Abbildung von Stellen benachbarter Fahrstreifen darstellen, sollen hingegen *Nebenspuradjazenzmatrizen* genannt werden. Mit der Bezeichnung „Spur“ in den Indizes der folgenden mathematischen Symbole ist hier die umgangssprachlich verwendete Benennung für Fahrstreifen gemeint, mit dem Zweck die Nomenklatur nicht zu lang werden zu lassen.

Definition 4.18 (Fahrstreifenadjazenzmatrix). Gegeben sei ein Formationsnetz mit r Fahrstreifen und o Aufenthaltsräumen (Stellen) pro Fahrstreifen. Die Stellen des Netzes seien nummeriert nach dem Schema $S_{i \cdot j + (j-1) \cdot o}$ mit der Nummer i des aktuellen Aufenthaltsraums auf dem j -ten Fahrstreifen. Dann bezeichnet die *Fahrstreifenadjazenzmatrix* \mathbf{A}_{Spur} die Abbildung $\mathbf{A}_{\text{Spur}} : \{S_k\} \rightarrow \{S_k\} \forall k = i \cdot j + (j-1) \cdot o$ und $j = \text{const.}$. Dann ist \mathbf{A}_{Spur} eine *Toeplitz-Matrix*, definiert durch die erste Zeile $a_{i,1} = [0, 1, 0, \dots, 0]$ für $i = (1, \dots, o)$ und der ersten Spalte $a_{1,j} = a_{i,1}^\top$.

Definition 4.19 (Nebenfahrstreifenadjazenzmatrix). Gegeben sei ein Formationsnetz mit r Fahrstreifen und o Aufenthaltsräumen (Stellen) pro Fahrstreifen. Die Stellen des Netzes seien nummeriert nach dem Schema $S_{i \cdot j + (j-1) \cdot o}$ mit der Nummer i des aktuellen Aufenthaltsraums auf dem j -ten Fahrstreifen. Dann bezeichnet die *Nebenfahrstreifenadjazenzmatrix* $\mathbf{A}_{\text{Nebenspur}}$ die Abbildung $\mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} : \{S_k\} \rightarrow \{S_n\} \forall |k - n| = o$. Dann ist $\mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} = \mathbf{I}_o$.

Mit Hilfe der Definitionen 4.18 und 4.19 lässt sich nun die Stellenadjazenzmatrix systematisch und im Rechner automatisiert aufbauen. Die Stellenadjazenzmatrix entsteht dann aus einer Zusammenstellung aus Fahrstreifenadjazenzmatrix und Nebenfahrstreifenadjazenzmatrix. Existiert keine Transition, die zum Vor- bzw. Nachbereich eines Stellenpaars gehört, so wird entsprechend Definition 4.17 die Matrix mit Nullen gefüllt.

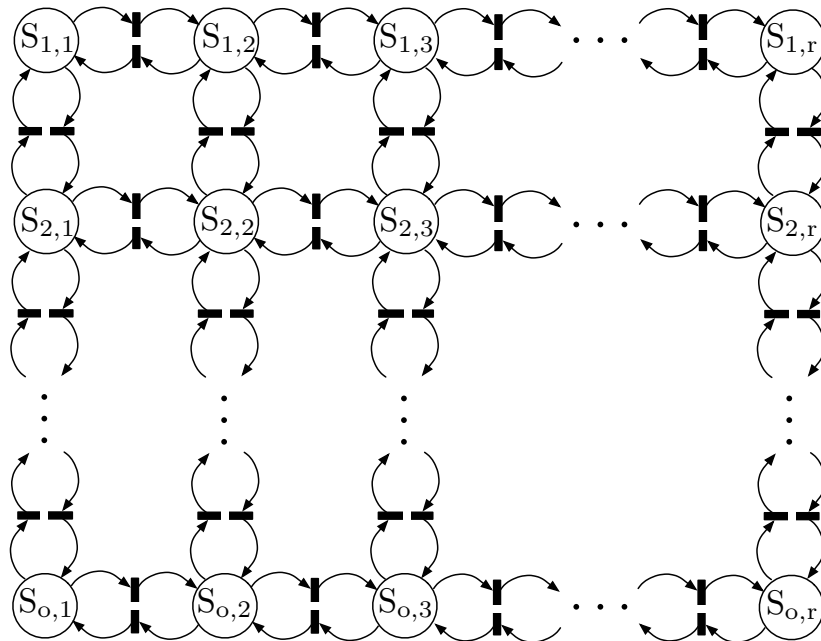


Abbildung 4.6: Struktur eines Formationsnetzes

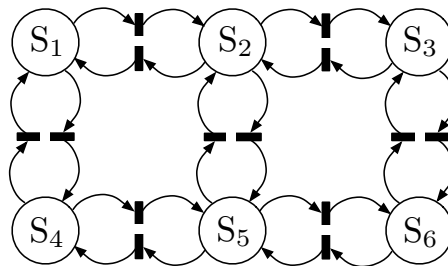


Abbildung 4.7: Vereinfachte Nummerierung der Stellen im Formationsnetz

Die Stellenadjazenzmatrix kann also für das Beispiel in Abbildung 4.7 angegeben werden zu

$$\mathbf{A}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{Spur}} & \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} \\ \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} & \mathbf{A}_{\text{Spur}} \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Erweitert man das Netz aus Abbildung 4.7 um einen weiteren Fahrstreifen, der darunter angefügt wird, so ergibt sich die Stellenadjazenzmatrix zu

$$\mathbf{A}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{Spur}} & \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} & \mathbf{0}_{o \times o} \\ \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} & \mathbf{A}_{\text{Spur}} & \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} \\ \mathbf{0}_{o \times o} & \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}} & \mathbf{A}_{\text{Spur}} \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Offensichtlich handelt es sich bei der Stellenadjazenzmatrix um eine Block-Toeplitz-Matrix, denn die Haupt- und Nebendiagonalblöcke sind ebenfalls konstant. Dies kann als Ausdruck der Selbstähnlichkeit des Petrinetzes interpretiert werden. Für jeden hinzugefügten Fahrstreifen erweitert sich die erste *Blockzeile* von \mathbf{A}_S rechtsseitig um einen Block $\mathbf{0}_{o \times o}$. Die Anzahl der Matrixblöcke in der ersten Blockzeile und der ersten Blockspalte ist also gegeben durch die Fahrstreifenanzahl r . Es kann daher ergänzend zur Definition 4.17 festgestellt werden, dass die Stellenadjazenzmatrix eine Block-Toeplitz-Matrix ist. Darauf aufbauend erfolgt die folgende Definition.

Definition 4.20 (Stellenadjazenzmatrix als Toeplitz-Matrix). Die Stellenadjazenzmatrix \mathbf{A}_S ist eine Block-Toeplitz-Matrix. Sie ist definiert durch die erste Blockzeile $\mathbf{a}_{i,1} = [\mathbf{A}_{\text{Spur}}, \mathbf{A}_{\text{Nebenspur}}, \mathbf{0}_{o \times o}, \dots, \mathbf{0}_{o \times o}]$ für $i = (1, \dots, r)$, sowie durch die erste Blockspalte $\mathbf{a}_{1,j} = \mathbf{a}_{i,1}^\top$.

Die Stellenadjazenzmatrix dient letztlich dazu, zunächst formal und später automatisch im Rechner die Inzidenzmatrix des Formationsnetzes zu bilden. Hierzu ist die Feststellung dienlich, dass jeder Eintrag der Stellenadjazenzmatrix mit dem Wert eins einer Transition des Formationsnetzes entspricht, was letztlich insbesondere in der Definition 4.17 zum Ausdruck kommt. Mittels dieser Kenntnis wird die Abbildung der Stellenmenge S_F auf die Transitionsmenge T_F und somit das Erstellen der Inzidenzmatrix möglich. Hierzu werden zunächst die Einträge der Matrix \mathbf{A}_S durch die Transitionsmenge ersetzt, wobei jede Transition nach der Reihenfolge ihres Auftretens in \mathbf{A}_S mit einer Nummer gekennzeichnet wird. Die hierdurch entstehende Matrix soll mit \mathbf{A}_{S_T} , der *Stellen-Transitions-Adjazenz-Matrix* bezeichnet

werden. Für unser Beispiel aus Abbildung 4.7 ergibt sich diese zu

$$\mathbf{A}_{S_T} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & t_1 & 0 & t_2 & 0 & 0 \\ t_3 & 0 & t_4 & 0 & t_5 & 0 \\ 0 & t_6 & 0 & 0 & 0 & t_7 \\ \hline t_8 & 0 & 0 & 0 & t_9 & 0 \\ 0 & t_{10} & 0 & t_{11} & 0 & t_{12} \\ 0 & 0 & t_{13} & 0 & t_{14} & 0 \end{array} \right]. \quad (4.14)$$

Definition 4.21 (Zuweisung der Transitionen mittels der Stellenadjazenzmatrix und Stellen-Transitions-Adjazenz-Matrix). Die Menge der Transitionen T_F eines Formationsnetzes ist gegeben durch die Einträge mit dem Wert eins der Stellenadjazenzmatrix $\mathbf{A}_S = (a_{i,j})$, mit $\dim(\mathbf{A}_S) = o \cdot r$. Für die formal korrekte Indizierung der Transitionen sei der Stellen-adjazenzvektor $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_k) = [\mathbf{a}_{1,j}, \mathbf{a}_{2,j}, \mathbf{a}_{3,j} \cdots, \mathbf{a}_{o \cdot r, j}]$ als Hintereinanderreihung der Zeilenvektoren der Stellenadjazenzmatrix definiert. Dann ist die Menge der Transitionen und die Indizierung der Transitionen gegeben durch

$$\begin{aligned} t_i \in T_F \text{ genau dann, wenn } \alpha_k = 1 \forall k = \{1, \dots, o \cdot r\} \\ \text{mit } i = i + 1 \text{ für jedes } \alpha_k = 1, \text{ startend bei } i = 0. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Der Transitionsvektor des Formationsnetzes heißt $\mathbf{t}_F = (t_i)$. Analog zum Stellenadjazenzvektor $\boldsymbol{\alpha}$ wird der Stellen-Transitions-Adjazenzvektor $\boldsymbol{\alpha}_{S_T}$ durch

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_{S_T} = (\alpha_k^t) \text{ mit } \alpha_k^t = t_i \text{ genau dann, wenn } \alpha_k = 1 \forall k = \{1, \dots, o \cdot r\} \\ \text{mit } i = i + 1 \text{ für jedes } \alpha_k = 1, \text{ startend bei } i = 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

eingeführt. Dieser lässt sich ebenfalls in einzelne Zeilenvektoren zerlegen, über welche die Stellen-Transitions-Adjazenzmatrix $\mathbf{A}_{S_T} = (a_{i,j}^t)$ mit dem Stellen-Transitions-Adjazenzvektor $\boldsymbol{\alpha}_{S_T} = (\alpha_k^t) = [\mathbf{a}_{1,j}^t, \mathbf{a}_{2,j}^t, \dots, \mathbf{a}_{o \cdot r, j}^t]$ definiert ist.

Mittels dieser Definition kann nun der Übergang von der Stellenadjazenzmatrix zur Inzidenzmatrix formuliert werden. Hierzu ist es notwendig, eine Konvention über die Lesart des Vor- und Nachbereichs aus der Stellen-Transitions-Adjazenzmatrix festzulegen, um den Vor- und Nachbereich der in \mathbf{A}_{S_T} gelisteten Transitionen zu spezifizieren. Hiernach lassen sich die Matrizen \mathbf{C}_{post} und \mathbf{C}_{pre} aufstellen, vgl. Definition 4.8. Wie dort eingeführt, ergibt sich die Inzidenzmatrix des Formationsnetzes

zu $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\text{post}} - \mathbf{C}_{\text{pre}}$ mit den elementweisen Zuordnungen der Matrizen

$$\mathbf{C}_{\text{post}} = (c_{i,k}^p) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \mathbf{A}_{S_T} = (a_{i,j}^t) = t_k \in T_F \forall j = \{1, \dots, o \cdot r\} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.17)$$

und

$$\mathbf{C}_{\text{pre}} = (c_{i,k}^p) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \mathbf{A}_{S_T} = (a_{j,i}^t) = t_k \in T_F \forall j = \{1, \dots, o \cdot r\} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.18)$$

Mit diesen beschriebenen Zusammenhängen ist die Struktur eines Formationsnetzes deutlich geworden. Es soll im Folgenden noch weiter auf die Spezifikation der Farbsätze Σ_F eingegangen werden, sowie deren Einfluss auf die Inzidenzmatrix, respektive Petrinetzdynamik. Hierzu ist es notwendig, die möglichen Intentionen der Fahrzeuge eines Clusters zu berücksichtigen. In Abschnitt 2.2.1 wurden bereits Attribute eines Fahrzeugagenten eingeführt. Durch die hier vorgenommene Annahme über die bereits vorliegende Existenz eines Clusters schränken sich die dortigen Attribute ein, die innerhalb eines Formationsnetzes seitens der Marken abgebildet werden. Die Intentionen eines Fahrzeugagenten innerhalb eines Clusters, modelliert durch ein Formationsnetz, sind daher auf das Verlassen des Verbandes durch das Nehmen einer Ausfahrt beschränkt.

Definition 4.22 (Farbsatz innerhalb des Formationsnetzes). Der Farbsatz $\Sigma = [\Sigma_1, \Sigma_2]$ repräsentiert für jede Marke (Token) eines Formationsnetzes die Attribute des Fahrzeugagenten:

- Σ_1 : im Cluster verbleibend
- Σ_2 : den Cluster verlassend bei einer Ausfahrt

Die Geschwindigkeit wird innerhalb des Clusters durch die Fahrzeugklasse vorgegeben und findet keine direkte Abbildung in der Petrinetzsymbolik. Im weiteren Verlauf soll stets davon ausgegangen werden, dass ein Cluster von Fahrzeugen bereits existiert. In einem späteren Vorhaben können dann die Intentionen eines Fahrzeugagenten verallgemeinert und ergänzt werden, wenn konkrete Fragestellungen zur Clusterbildung, Clusterauflösung und Clusterveränderung behandelt werden. Nach Definition 4.22 besteht vor dem Auftreten einer Ausfahrt, modelliert im übergeordneten Straßennetz, nur die Möglichkeit, dass sich zwei Fahrzeuggruppen

unterschiedlicher Intention herausstellen. Für die spätere Analyse der Dynamik des farbigen Formationsnetzes ist es notwendig, hierzu ein möglichst einfaches Verfahren zu finden. Aufgrund der Tatsache, dass laut Definition 4.16 die Stellen sämtliche Farbsätze annehmen können und die Kapazität stets eins ist, kann die Erstellung der gemeinsamen Netzdynamik dekomponiert werden, und zwar auf die Dynamiken von zwei strukturell identischen Netzen für jede Farbe. Vor Auswertung der Dynamikgleichung 4.4 wird nur wechselseitig pro Netz überprüft, ob die jeweilige Transition auch aufgrund des anderen Netzes in Konzession ist. So ist eine betrachtete Transition genau dann in Konzession, wenn sie im eigenen Netz der betrachteten Marke in Konzession ist, sowie der Nachbereich der Transition im Netz der Marken der anderen Farbe nicht belegt ist. Bei der Untersuchung der Netzdynamik für die Intention Σ_2 wird letztlich das Netz aller Marken mit Σ_2 betrachtet, jedoch auch unter Betrachtung der zusätzlichen Konzessionsbedingung des Netzes der Marken mit Σ_1 . Die Repräsentation des farbigen Formationsnetzes durch zwei einzelne (BE)-Netze ist in Abbildung 4.8 visualisiert.

Definition 4.23 (Netzdynamik für farbige Formationsnetze). Gegeben sei PN_F als farbiges Formationsnetz mit dem Farbsatz Σ . Gegeben seien die Markierungsvektoren m_{Σ_1} und m_{Σ_2} identischer Länge. Die Dynamik wird dann für Marken von m_{Σ_2} betrachtet.

PN_F wird repräsentiert durch zwei strukturell identische Netze $PN_{F_{\Sigma_1}}$ und $PN_{F_{\Sigma_2}}$ mit jeweils nur einer Markenfarbe. Die Netzdynamik der Marken m_{Σ_2} in $PN_{F_{\Sigma_2}}$ ist dann durch die geänderte Konzessionsregel induziert:

Eine Transition $t \in T_{F_{\Sigma_2}}$ ist in Konzession wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$\forall s_{\Sigma_2} \in \bullet t : m(s_{\Sigma_2}) \geq W(s_{\Sigma_2}, t) \quad (4.19)$$

$$\forall s_{\Sigma_2} \in t \bullet : m(s_{\Sigma_2}) \leq K(s_{\Sigma_2}) - W(s_{\Sigma_2}, t) \quad (4.20)$$

$$\forall s_{\Sigma_1} \in t \bullet : m(s_{\Sigma_2}) \leq K(s_{\Sigma_1}) - W(s_{\Sigma_1}, t) \quad (4.21)$$

Die ersten beiden Bedingungen beziehen sich hierbei auf die Vor- und Nachbedingungen der Transition t im Netz $PN_{F_{\Sigma_2}}$. Die dritte Bedingung betrifft hingegen zusätzlich die Überprüfung der Nachbedingung der t entsprechenden Transition im Netz $PN_{F_{\Sigma_1}}$. Es gelten weiterhin die eingeführten Beschränkungen der Kapazität

und der Kantengewichte auf den Wert eins.

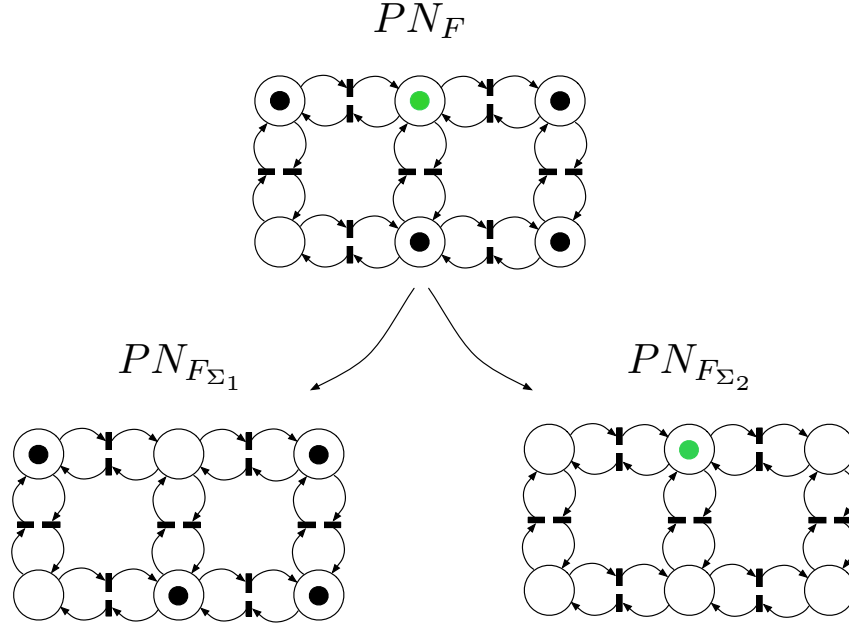


Abbildung 4.8: Repräsentation eines farbigen Formationsnetzes durch zwei Formationsnetze identischer Topologie

Mittels dieser eingeführten Definitionen ist es nun möglich, Cluster als Petrinetze zu modellieren und Intentionen der Fahrzeuge mit Hilfe des Farbsatzes zu unterscheiden. Über die beschriebenen Zusammenhänge der linearen Algebra kann die Dynamik dieser Netze mit dem Zweck der Herleitung von Entscheidungsmechanismen rechnerseitig abgebildet und analysiert werden. Die Intentionen von Fahrzeugen hängen jedoch nicht nur von Parametern des jeweiligen Clusters ab, sondern werden maßgeblich durch infrastrukturelle Umgebungsbedingungen mit bestimmt. Um diesen Zusammenhang abzubilden, müssen die Infrastruktur und die damit verbundenen Zustände von Clustern ebenfalls in geeigneter Form modelliert werden. Dies erfolgt im anschließenden Abschnitt *Straßennetz*.

4.3.2 Straßennetz

Nach Definition 4.14 stellt das Straßennetz von Autobahnen als Petrinetzmodell das Systemnetz zu dem oben beschriebenen Formationsnetz dar. Formationsnetze erscheinen im Straßennetz als *Metatoken* respektive Objektnetze, deren Verhalten

mittels einer Interaktionsrelation mit dem Straßennetz verknüpft ist, vgl. Definition 4.13. Bevor die Interaktionsrelation eingeführt wird, soll zunächst das Straßennetz als Petrinetz definiert werden.

Definition 4.24 (Straßennetz). Ein *Straßennetz* ist ein Tupel

$$\mathcal{S} = PN_{\mathcal{S}} = \{\Sigma_{\mathcal{S}}, S_{\mathcal{S}}, T_{\mathcal{S}}, F_{\mathcal{S}}, K_{\mathcal{S}}, C_{\mathcal{S}}, W_{\mathcal{S}}, \mathbf{m}_{\mathcal{S}}\}.$$

$\Sigma_{\mathcal{S}} = \{\Sigma_1, \Sigma_2, \dots\}$ bezeichnet die Menge verschiedener Farbsätze, welche die Markenattribute repräsentieren. Die Marken selbst sind *Metatoken*, d.h. Objektnetze, die Formationsnetze repräsentieren. Mit den Farbsätzen werden diskrete Zustände der Formationsnetze modelliert. Die Stellenmenge des Straßennetzes $S_{\mathcal{S}}$ ist eine räumlich diskrete Repräsentation eines Fahrtrichtungstreifens.

Eine Stelle besitzt eine räumliche Ausdehnung, die genau derjenigen des jeweils betrachteten Formationsnetzes entspricht, zuzüglich des notwendigen geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstandes. Das heißt, pro Formationsnetz existiert im Allgemeinen genau ein Straßennetz.

Die Menge der Transitionen $T_{\mathcal{S}}$ repräsentiert zum einen die Fortbewegung der Formationsnetze im Straßennetz. Zum anderen werden über die Transitionen Infrastrukturänderungen, wie z. B. die Änderung der Fahrstreifenanzahl, sowie die Begegnung von Clustern modelliert, die auf der Formationsnetzebene bestimmte Handlungen hervorrufen. Diese Transitionen repräsentieren transitionsberandete sog. *Straßensubnetze*, die eine detaillierte Modellierung der durchzuführenden Handlungen auf Formationsnetzebene zulassen, vgl. Abschnitt 4.4.2 ff.

Von Formationsnetz zu Formationsnetz sich unterscheidende Straßennetze besitzen daher an den räumlichen Stellen, wo Infrastrukturbedingungen sich ändern, identische Transitionen. Begegnen sich mehrere Cluster, so wird dasjenige Straßennetz für die Analyse oder Simulation beider Formationsnetze genutzt, dessen Stellen die größtmögliche physikalisch räumliche Ausdehnung repräsentieren.

Die mit den Stellen assoziierten Kapazitäten $K_{\mathcal{S}}$ sind jeweils durch Elemente des Wertes eins charakterisiert, sofern die Modellierung einer Verkehrssituation es nicht bedingt, Cluster von Fahrzeugen unterschiedlicher Intentionen und damit Metatoken unterschiedlicher Farben in einer Stelle zu aggregieren, d. h. mehrere Formationsnetze in einer Stelle des Straßennetzes durch mehrere Metatoken abzubilden. In einem solchen Fall entspricht die Kapazität der betreffenden Stellen der Anzahl an auf-

tretenden Intentionen (Farben von Metatoken). Dasselbe gilt für die Elemente der Kantengewichte W_S .

Die Farbfunktion $C_S : S_S \rightarrow \Sigma_S$ ordnet jeder Stelle mindestens einen Farbsatz zu. Grundsätzlich besitzt jede Stelle jeden Farbsatz, ist also in der Lage unterschiedlich attribuierte Formationsnetze aufzunehmen. Sofern es die Modellierung der jeweiligen Verkehrssituation erfordert, kann der Farbsatz einer Stelle jedoch auf eine bestimmte Farbe des betreffenden Metatoken beschränkt werden.

Der Markierungsvektor \mathbf{m}_S bezeichnet die Position von Fahrzeugformationen im Straßennetz, die durch Metatoken \mathcal{M}_i mit $i = 1 \dots n$ charakterisiert werden.

Eine Visualisierung zur Repräsentation einer Autobahn als ein Petrinetz gem. Definition 4.24 ist in Abbildung 4.9 gegeben. Für jede Fahrtrichtung wird ein eigenes Netz aufgespannt. Die dort dargestellte Abfahrt wird durch eine Transition modelliert. Diese beeinflusst das Verhalten eines Formationsnetzes, wenn dort als Token modellierte Fahrzeuge die Farbe für die Intention besitzen, von der aktuellen Autobahn abzufahren. In diesem Falle würde der Metatoken in zwei Gruppen von Fahrzeugen, d.h. in zwei Formationsnetze, geteilt werden.

Die hier skizzierte Modellierung einer Abfahrt als Transition, die auf den Ausführungen der Abschnitte 4.4.2 ff. beruht, erfolgt hierbei in Konsistenz zur Definition von Objektsystemen (siehe Def. 4.12 und [145]), bei denen eine Zustandsänderung (Transition) auf Systemnetzebene eine Zustandsänderung auf Objektnetzebene hervorruft. Daher wurde hier keine ebenfalls denkbare Modellierung von Abfahrt und Auffahrt *als Stelle* vorgenommen, da dies in diesem Sinne nicht konsistent wäre.

Hiernach werden Infrastrukturänderungen als konsekutiv hervorgerufene Zustandsänderungen des Formationsnetzes interpretiert. Eine solche Beeinflussung des Formationsnetzes wird durch die Interaktionsrelation beschrieben, wie es im Folgenden weiter ausgeführt wird.

4.4 Attributrelationen und Verkehrssituationen als Objektsystem

Formationsnetze und die jeweils über die physikalisch räumliche Ausdehnung von Clustern erzeugten zugehörigen Straßennetze bilden gem. Definition 4.13 ein farbiges Objektsystem. Das Systemnetz entspricht dem oben erläuterten Straßennetz,

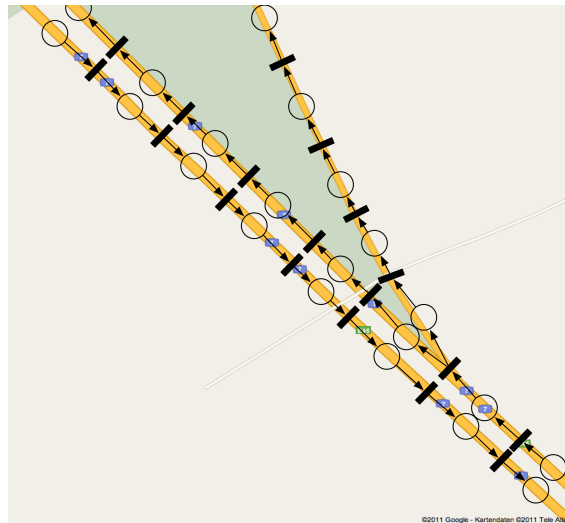


Abbildung 4.9: Beispielhafte Modellierung des Straßennetzes

während das Objektnetz ein Formationsnetz darstellt. Zwischen diesen ist die Interaktionsrelation ρ zu definieren. Um dies durchzuführen, muss zunächst untersucht werden, welche Zustandsänderungen auf Systemnetzebene vorliegen und welche Aktionen diese auf der Objektnetzebene induzieren. Durch die Einschränkung des hier zu modellierenden Straßenverkehrs auf Autobahnen müssen nur folgende Änderungen der Infrastruktur berücksichtigt werden:

- Erweiterung des betreffenden Fahrtrichtungsstreifens um Fahrstreifen,
Kurzbezeichnung: Fahrstreifenerweiterung
- Reduktion des betreffenden Fahrtrichtungsstreifens um Fahrstreifen,
Kurzbezeichnung: Fahrstreifenverengung
- Abfahrt
- Auffahrt

Desweiteren existieren Verkehrssituationen, die nicht durch Änderung der Infrastruktur bedingt sind. Hierzu zählt als einfachste insbesondere die Fortbewegung des Clusters. Darüber hinaus existieren Verkehrssituationen, die allein auf der Tatsache beruhen, dass Cluster unterschiedlicher Attribute einander begegnen oder eine Gruppe von Fahrzeugen aufgrund sich geänderter Attribute in mehrere Cluster getrennt (separiert) werden. Es folgt die Zusammenfassung solcher infrastrukturunabhängigen Verkehrssituationen:

- Vorwärtsbewegung und Anpassung der Formation
- Begegnung von Clustern
 - Assimilation
 - Überholen
- Separation von Clustern

Diese Aktionen werden durch Transitionen modelliert, wobei Fahrstreifenerweiterungen und Fahrstreifenverengungen im Gegensatz zu Auf- und Abfahrten keine Änderung der Topologie des Straßennetzes erzeugen, das den jeweils modellierten Straßenabschnitt repräsentiert. Die Transitionen verfügen also über ein Attribut, um implementierungstechnisch auf Formationsnetzebene zu erkennen, welche Art von Verkehrssituation jeweils vorliegt. Die Interaktionsrelation sieht nun vor, dass bei Fahrstreifenerweiterung und -verengung sowie bei Auf- und Abfahrt, d. h. beim Feuern der betreffenden damit assoziierten Transition eine Änderung des Formationsnetzes durchgeführt wird. Diese Änderungen betreffen jedoch nicht nur die Rekonfiguration der Formation, das heißt die Markenverteilung im Netz. Das Feuern solcher Transitionen muss darüber hinaus auch eine Topologieänderung auf Formationsnetzebene bewirken können, zum Beispiel durch Hinzufügen oder Abziehen der Petrinetzelemente, die einen Fahrstreifen repräsentieren. Dies kann durch die Operationen *Einbettung* bzw. *Restriktion* gem. Definition 4.11 in Petrinetznotation formal beschrieben und somit auch programmiertechnisch implementiert werden. Da eine Rekonfiguration der Formation auf Formationsnetzebene erst erfolgen kann, wenn die Netztopologie entsprechend der Transition des Straßennetzes angepasst wurde, ist es sinnvoll, Topologieänderungen und Formationsänderungen auf Straßennetzebene in Form von jeweils *einzelnen* Transitionen zu modellieren. Das heißt, pro Transition des Straßennetzes wird nur eine dieser Aktionen jeweils repräsentiert. Die Transitionen für Topologieänderung und Anpassung der Formation werden somit konsekutiv im Straßennetz angeordnet. Formal lässt sich die Menge der Transitionen des Straßennetzes als Multimenge der Transitionsmengen für Fahrstreifenerweiterung und -verengung, Auf- und Abfahrt sowie der Vorwärtsbewegung darstellen.

4.4.1 Interaktionsrelation und Attribuierung der Modellierungskonstituenten

Zur Spezifikation der Interaktionsrelation wird bei Betrachtung der zu modellierenden Verkehrssituationen deutlich, dass diese in zwei Wirkrichtungen spezifiziert sein muss: vom Straßennetz zum Formationsnetz – die Interaktion mit der Umgebung abbildend – und vom Formations- zum Straßennetz, was auf Grundlage der Definition 4.24 insbesondere bei der Abhängigkeit der räumlich physikalischen Ausdehnung von Stellen des Straßennetzes von Attributen des Clusters zu Tage tritt. Bei Variation der Clustergeschwindigkeit oder der Clustergröße resultiert hiernach ein sich stetig anpassendes, in seiner räumlichen Ausdehnung *pulsierendes* Straßennetz. Dies tritt insbesondere bei Zustandsänderungen des Formationsnetzes auf. An den räumlichen Positionen der Infrastrukturänderungen bleibt das Straßennetz jedoch räumlich fest zugeordnet, das heißt an seinen räumlich zugeordneten Transitionen fixiert.

Die Induktion, d. h. das Hervorrufen von Aktionen auf Formationsnetzebene und die Abbildung dortiger Zustände und Aktionen im Straßennetz bedingen einen Austausch von Informationen zwischen Objektnetz- und Systemnetzebene. Hierzu ist eine Attribuierung der jeweiligen Petrinetzelemente mit entsprechenden Größen notwendig. Dies verdeutlicht Abbildung 4.10, in welcher der hier zugrunde gelegte Informationsfluss visualisiert ist. Auf der linken Seite ist das betrachtete Formationsnetz mit all seinen Elementen als Symbol \mathcal{F}_i dargestellt. Der jeweilige Zustand des Formationsnetzes wird mittels des Attributtupels $\mathbf{a}_{\mathcal{F}_i}$ repräsentiert. Diese Information wird auf das Attributtupel $\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i}$ des Metatokens \mathcal{M}_i abgebildet. Die Abbildung zwischen diesen Attributtupeln wird in Form der Funktion $\rho_{\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{M}}$ realisiert. Das Metatoken repräsentiert letztlich in kompakter Form das Attributtupel und ermöglicht auf graphischer Ebene eine geeignete Visualisierung. Die von den Verkehrssituationen abhängigen zu spezifizierenden diskreten Zustände definieren also den Farbsatz des Straßennetzes. Eine solche Repräsentation des Informationsflusses als Abbildung zwischen zwei Attributtupeln ist auch zwischen dem jeweiligen Metatoken \mathcal{M}_i und der Stellenmenge S_S gegeben. Die zugehörige Funktion wird mit $\rho_{\mathcal{M} \rightarrow S_S}$ bezeichnet und überführt das Tupel $\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i}$ in $\mathbf{a}_{S_S}^{\mathcal{M}_i}$, d.h. nur in einen Teil des gesamten Attributtupels des Straßennetzes. Das Subtupel $\mathbf{a}_{S_S}^S$ repräsentiert die seitens der Topologie des Straßennetzes pro Stelle festgelegten Attribute, die nicht von einem Formationsnetz

beeinflusst werden können. Eine solche Relation ist auch zwischen dem Metatoken \mathcal{M}_i und der Transitionsmenge T_S des Straßennetzes vorgesehen. Die Funktion $\rho_{\mathcal{M} \rightarrow T_S}$ bildet das Attributtupel des Metatoken $\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i}$ auf das Tupel der Transitionsmenge ab, jedoch nur auf den Teil $\mathbf{a}_{T_S}^{\mathcal{M}_i}$, der nicht durch die Infrastruktur gegeben ist. Eine Änderung von Attributen im Formationsnetz – wie z. B. durch einige Fahrzeuge mit der Intention, den derzeitigen Cluster zu verlassen – erzeugt hierdurch eine Änderung von Attributen folgender Transitionen auf Straßennetzebene, z. B. zur Transition, die den Prozess eines Überholmanövers repräsentiert.

Eine wichtige Relation ist diejenige zwischen der Transitionsmenge des Straßennetzes T_S und dem Formationsnetz \mathcal{F}_i , die mit $\rho_{T_S \rightarrow \mathcal{F}}$ bezeichnet wird. Durch diese Abbildung, welche die Attribute der Transitionsmenge $[\mathbf{a}_{T_S}^{\mathcal{M}_i}, \mathbf{a}_{T_S}^S]$ mit denen des Formationsnetzes $\mathbf{a}_{\mathcal{F}_i}$ verknüpft, wird durch die Änderung eines Attributs von \mathcal{F}_i eine Folge von lokalen Zustandsänderungen auf Formationsnetzebene hervorgerufen. Diese Zustandsänderungen können hierbei entweder die Formation betreffen oder die Topologie des Formationsnetzes.

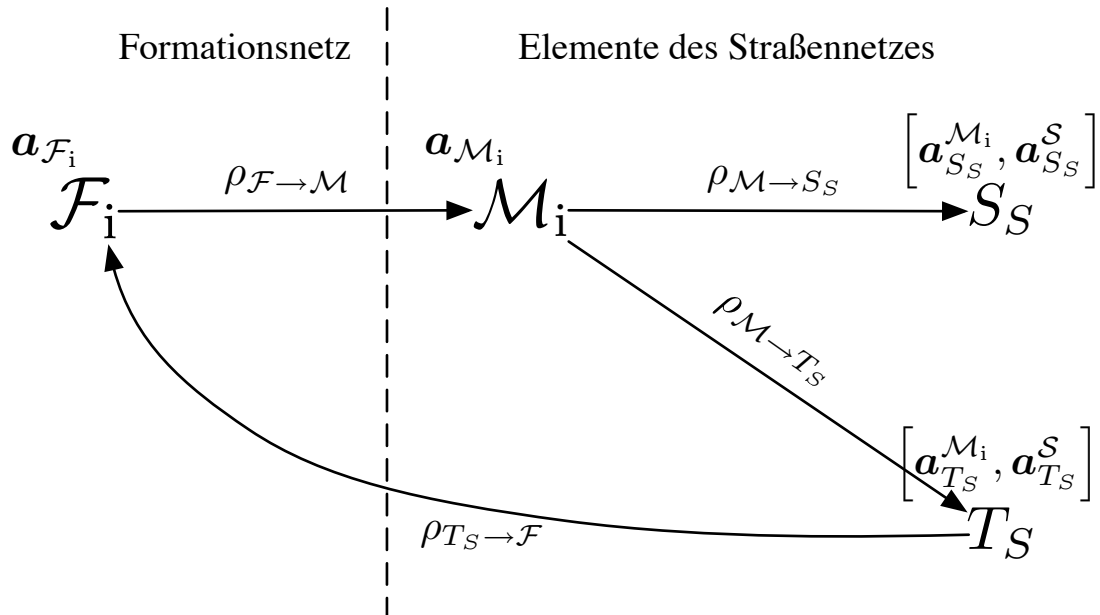


Abbildung 4.10: Informationsfluss zwischen den Modellierungsebenen und den Komponenten des Straßennetzmodells

Die mittels dieser Darstellung der Attributrelationen gestaltete Interaktionsrelation zwischen Objekt- und Systemnetz, d.h. Formations- und Straßennetz, kann mittels Formel 4.22 in kompakter Form angegeben werden.

$$\rho = \{\rho_{\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{M}}, \rho_{T_S \rightarrow \mathcal{F}}\} \quad (4.22)$$

Die einzelnen Funktionen in ρ werden nun anhand der Zuordnung der jeweiligen Attribute spezifiziert.

Relation zwischen Formationsnetz und Metatoken. Die hier eingeführten Attribute des Formationsnetzes lauten wie folgt:

- Topologie, repräsentiert durch Stellenadjazenzmatrix \mathbf{A}_S
- Formation, d.h. der Markierungsvektor \mathbf{m}_F wobei $\forall x \in \mathbf{m}_F$ gilt $x \in \mathcal{I}$
- Räumliche Längsausdehnung des Formationsnetzes l_F
- Formation besitzt maximale Dichte, repräsentiert durch b_{density} , gem. Def. 2.6
- Mittlere Geschwindigkeit v_m
- Vorhandene Intentionen $\mathcal{I} = \{I_{\text{cluster}_{\text{leave}}}, I_{\text{cluster}_{\text{assimilate}}}, I_{\text{exit}}, I_{\text{stay}}, I_{\text{enter}}\}$
 - Trennen aus einem Cluster: $I_{\text{cluster}_{\text{leave}}}$
 - Anschließen an einen Cluster: $I_{\text{cluster}_{\text{assimilate}}}$
 - Verlassen der Autobahn mit der nächsten Abfahrt: I_{exit}
 - sich weiter auf aktueller Fahrbahn fortbewegen: I_{stay}
 - Auffahrt benutzen: I_{enter}
- Eine oder mehrere Fahrstreifen werden vom Cluster nicht ausgenutzt: $b_{\text{na_lanes}}$
- Fahrzeuge unterschiedlicher Intentionen sind im Formationsnetz räumlich voneinander getrennt: b_{sepInt}
- Formation ist bzgl. der Verkehrssituation rekonfiguriert: b_{Sorted}

Die Attribute bieten den vollständigen Überblick über die Merkmalsmenge des Formationsnetzes und die darin als Token modellierten Fahrzeuge, indem durch die Attribuierung die Topologie und die Stellenbelegung hinreichend abgebildet werden. Nachfolgend werden notwendige Informationen für die übergeordnete Straßennetzebene zusammengefasst, wie die mittlere Geschwindigkeit, vorhandene Intentionen und die Zustände der Formation, die sich aus der Topologie und dem Markierungsvektor ableiten lassen. Diese Attribute werden auf Straßennetzebene weiterhin genutzt. Der Farbsatz des Formationsnetzes ist gegeben durch die im Formationsnetz vorhandenen Intentionen, die in der Menge \mathcal{I} zusammengefasst sind. Die Marken des Formationsnetzes bilden diese Intentionen ab und nutzen die Bezeichnungen der Elemente von \mathcal{I} als Markenattribut. In der Visualisierung sind den Marken unterschiedliche Farben zugeordnet. Für die reguläre Fortbewegung auf der aktuellen Fahrbahn wird standardmäßig die Farbe schwarz verwendet. Für einen anderen Fahrtwunsch wird die Farbe grün, bzw. pink verwendet. Die mit b bezeichneten Attribute sind vom Typ boolean.

Daraus folgt für das Attributtupel einer Formation \mathcal{F}_i :










$$\mathbf{a}_{\mathcal{F}_i} = \{ \mathbf{A}_S, l_F, \mathbf{m}_F, b_{\text{density}}, v_m, \mathcal{I}, b_{\text{na_lanes}}, b_{\text{sepInt}}, b_{\text{Sorted}} \} \quad (4.23)$$

Die Attribute des Metatokens leiten sich im Allgemeinen aus diesem Attributtupel ab. Durch die Bereitstellung bereits abgeleiteter boolescher Attribute an das Straßennetz ist es hier jedoch hinreichend, die Abbildung $\rho_{\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{M}}$ gem. Gleichung 4.24 einzuführen.

$$\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i} = \rho_{\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{M}}(\mathbf{a}_{\mathcal{F}_i}) = \mathbf{a}_{\mathcal{F}_i} \quad (4.24)$$

Für die spätere visuelle Darstellung soll hier noch die Zuordnung des Farbsatzes für einen Metatoken erfolgen. Diese Zuordnung ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Die räumliche Ausdehnung des Clusters ist, genauso wie die Geschwindigkeit, in der Visualisierung nicht mit abgebildet, sie wird jedoch im zugehörigen Vektor $\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i}$ weiterhin mitgeführt, der aus der Topologie und dem Markierungsvektor abgeleitet wird.

Tabelle 4.1: Visuelle Token-Attribuierung des Straßennetzes

Metatoken-Eigenschaft	Symbolik
Regulär	
Intention: Auffahren	
Intention: Abfahren	
Assimilierte Intentionen	
Mehrere Intentionen	
Zwecks Aktion sortierte Intentionen	
Es existieren freie Fahrstreifen, auch mit beliebiger Intentionsanzahl	
Räumlich getrennte Intentionen	
Getrennte Formationsnetze	

Relation zwischen Metatoken und Stellenattributen. Die Relation $\rho_{\mathcal{M} \rightarrow S_S}$ bildet den Attributvektor des jeweiligen Metatoken auf die Eigenschaften der Stellen und der Stellenmenge des Straßennetzes ab. Die hier zu betrachtende Eigenschaft der Stellenmenge ist die Anzahl der Stellen des Straßennetzes. Diese variiert in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl und des (eingeregelten) Sicherheitsabstandes in einem betrachteten Cluster und damit von der Längsausdehnung des Clusters. Diese Eigenschaft der Stellenmenge wird jeder einzelnen Stelle zugeordnet. Aus festen Parametern der Modellierung des Straßennetzes, d.h. Positionen von Infrastrukturänderungen und den Distanzen zwischen diesen, ergibt sich die Anzahl der zu modellierenden Stellen im Straßennetz und hieraus deren Positionen in einer digitalen Karte. Die Stellen werden zwischen Infrastrukturänderungen, die durch Transitionen modelliert werden, äquidistant verteilt.

Hierzu sei $\mathbf{d}_{\text{InfStrk}}$ der Vektor der Distanzen zwischen Infrastrukturänderungen entlang der Strecke. Desweiteren ist l_F die Längsausdehnung des betrachteten Clusters. Dann ist der Vektor, dessen Elemente die jeweilige Stellenanzahl zwischen Infrastrukturänderungen angeben, beschrieben durch

$$\mathbf{p}_S = \mathbf{d}_{\text{InfStrk}}/l_F. \quad (4.25)$$

Hierbei ist \mathbf{p}_S dem Tupel $\mathbf{a}_{S_S}^{\mathcal{M}_i}$ zuzuordnen, während $\mathbf{d}_{\text{InfStrk}}$ als Element von $\mathbf{a}_{S_S}^S$ streckenseitig vorgegeben ist, d.h. nicht durch den Metatoken beeinflusst wird. Ein weiteres Attribut, das streckenseitig vorgegeben und damit $\mathbf{a}_{S_S}^S$ zuzuordnen ist, ent-

spricht dem stellenseitigen Farbsatz. In Abhängigkeit der Position der jeweiligen Stelle und der jeweils modellierten Verkehrssituation ergibt sich für die betrachtete Stelle ein definierter Farbsatz, der jegliche Tokenfarbe annehmen kann, und zwar abweichend von der üblichen Konvention. Daher ist der Farbsatz der Stellen Σ_S ebenfalls als Teil von $\mathbf{a}_{S_S}^S$ anzusehen. Der jeweilige Farbsatz findet sich in der expliziten Modellierung von Verkehrssituationen, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben ist. Zusammenfassend sind diese Zusammenhänge in Gleichungen 4.26 und 4.27 angeben.

$$\mathbf{a}_{S_S}^S = \{ \mathbf{d}_{\text{InfStrk}}, \Sigma_S \} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{a}_{S_S}^{\mathcal{M}_i} = \rho_{\mathcal{M} \rightarrow S_S}(\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i}) = \{ \mathbf{p}_S \} \quad (4.27)$$

Relation zwischen Metatoken und Transitionsattributen. Sofern nicht durch Infrastrukturänderungen verursacht, können Aktionen auf Formationsnetzebene auch aus dem Formationsnetz selbst heraus hervorgerufen werden. Hierzu dient die Relation zwischen den Attributen des Metatoken und denjenigen der Transitionen des Straßennetzes. Letztere besitzen zum einen ein Attribut, welches die durchzuführen- de infrastrukturseitig gegebene Aktion codiert. Zum anderen existiert ein Attribut, das dazu dient, Aktionen zu codieren, die seitens des Metatoken induziert werden. Diese werden $a_{T_S}^{\text{infrstr}}$ und $a_{T_S}^{\mathcal{M}}$ genannt, sodass für die Attributmenge der Transitionen des Straßennetzes

$$\mathbf{a}_{T_S} = \{ a_{T_S}^{\text{infrstr}}, a_{T_S}^{\mathcal{M}} \} \text{ gilt.} \quad (4.28)$$

Zu den infrastrukturseitigen Änderungen, die in $a_{T_S}^{\text{infrstr}}$ codiert werden, zählen Abfahrt, Auffahrt, Fahrstreifenverengung und Fahrstreifenerweiterung. Formal stellt sich das Attribut jeweils als Element der Menge der Transitionen dar, die infrastrukturseitige Änderungen hervorrufen, wie es Gleichung 4.29 verdeutlicht

$$a_{T_S}^{\text{infrstr}} \in \{ t_{\text{auf}}, t_{\text{ab}}, t_{\text{vereng.}}, t_{\text{erweit.}} \}. \quad (4.29)$$

Die Transitionen, die hiernach mit $a_{T_S}^{\text{infrstr}}$ attribuiert sind, entsprechen kompakten Repräsentationen konsekutiv angeordneter Transitionen auf einer Subnetzebene des Straßennetzes. Auf einer solchen Subnetzebene werden elementare Aktionen mo-

delliert und entsprechend der übergeordneten Ebene zur Verkehrssituation passend angeordnet. Dies entspricht pro Transition, die mit $a_{T_S}^{\text{infrstr}}$ attribuiert ist, einer Dekomposition in ein transitionsberandetes Subnetz. Die Menge der Attribute, dessen elementare Transitionen auf Substraßennetzebene mit $\mathbf{a}_{T_{S_{\text{sub}}}}$ bezeichnet werden, ist gegeben durch

$$\mathbf{a}_{T_{S_{\text{sub}}}} = \{t_{\text{sep}}, t_{\text{aggr.}}, t_{\text{assimil.}}, t_{\text{topol.}}, t_{\text{rekonf.}}\}. \quad (4.30)$$

In Gleichung 4.30 entsprechen diese in der Reihenfolge ihres dortigen Auftretens, den Aktionen *Separation*, *Aggregation*, *Assimilation*, *Topologieänderung des Formationsnetzes* und der *Rekonfiguration der Formation*. In diesen Begriffen sind abstrakte Handlungsanweisungen bzw. Ziele codiert, die auf Formationsnetzsebene realisiert werden. Dies ist im nächsten Abschnitt beschrieben.

Das Attribut einer Transition auf Straßennetzebene, das durch einen Metatoken beeinflusst wird, repräsentiert durch $a_{T_S}^{\mathcal{M}}$, ist gegeben als ein Element der Menge bestehend aus Intensionsänderung, Separation von Clustern, Zusammenführung von Clustern oder Überholen von Clustern, sofern diese sich begegnen, was formal dargestellt wird durch

$$a_{T_S}^{\mathcal{M}} \in \{t_{\text{Intensionsaenderung}}, t_{\text{ClusterSeparation}}, t_{\text{ClusterMerge}}, t_{\text{Ueberholen}}\}. \quad (4.31)$$

Diese Aktionen, bis auf die Intensionsänderung, lassen sich wiederum auf Subnetzebene des Straßennetzes dekomponieren, sodass sie konsekutiven Anordnungen von Transitionen mit Attributen der Menge $\mathbf{a}_{T_{S_{\text{sub}}}}$ entsprechen. Die Separation von Clustern entspricht der Aufteilung in mehrere Cluster, bedingt durch geänderte Intentionen. Das Zusammenfügen von Clustern – *Merge* – geschieht bei Begegnung von Clustern im Straßennetz, sofern die Fahrzeugattribute identisch sind, gem. Def. 2.3. Ist Letzteres nicht der Fall, überholt ein Cluster den jeweils langsameren. Für die Abbildung $\rho_{\mathcal{M} \rightarrow S_S}$ gilt zusammenfassend

$$a_{T_S}^{\mathcal{M}} = \rho_{\mathcal{M} \rightarrow S_S}(\mathbf{a}_{\mathcal{M}_i}). \quad (4.32)$$

Relation zwischen Transitions- und Formationsnetzattributen. Mittels der Attributmenge \mathbf{a}_{T_S} ist auf Straßennetzebene bekannt, welche Aktionen und in welcher Reihenfolge diese aufgrund der Anordnung der dazugehörigen Transitionen

konkret ausgeführt werden sollen. Dies erfolgt durch Umsetzung der so kodierten abstrakten Handlungsanweisungen auf Formationsnetzebene. Die Attribute des Formationsnetzes $\mathbf{a}_{\mathcal{F}_i}$ werden zum einen durch Aktionen der Formation selbst geändert. Zum anderen werden diese direkt durch die Konfiguration des Straßennetzes angepasst. Beide Typen dieser Änderungen werden jedoch zwecks Übersichtlichkeit zu einer gemeinsamen Abbildung zusammengefasst, da es modellierungstechnisch keinen Unterschied macht, ob Attribute genuin durch Handlungen der Formation geändert werden, d.h. damit nur indirekt über die Transitionen des Straßennetzes oder direkt durch letztere beeinflusst werden. Diese Abbildung $\rho_{T_S \rightarrow \mathcal{F}}$ ist daher gegeben durch

$$\mathbf{a}_{\mathcal{F}_i} = \rho_{T_S \rightarrow \mathcal{F}}(\mathbf{a}_{T_S}). \quad (4.33)$$

Die einzelnen Transitionen auf Subnetzebene des Straßennetzes repräsentieren konkrete Aktionen auf Formationsnetzebene, die im Folgenden genauer spezifiziert werden sollen. Die Attributmenge dieser Transitionen ist gegeben durch $\mathbf{a}_{T_{\text{sub}}}$.

Separation. Bei der Transition zur Separation müssen in der Vorstelle des Straßensubnetzes zwei oder mehr Formationsnetze existieren, deren Token mit unterschiedlichen Intentionen attribuiert sind. Diese sind durch Metatoken unterschiedlicher Farbe auf Straßensubnetzebene gekennzeichnet. Die Transition der Separation ist so attribuiert, dass sie unabhängig von der Farbe jeweils einen Metatoken abzieht und einen Token gleicher Farbe erzeugt. Das heißt, bei zwei vorhandenen Intentionen würde die Transition zweimal hintereinander schalten. Der Transition der Separation folgt anschließend auf Straßennetzebene eine Anzahl an Stellen, die der Anzahl der Intentionen auf Subnetzebene entspricht. Diese Stellen sind jeweils mit nur einer Farbe attribuiert. Die Bögen zwischen einer Separationstransition und der jeweiligen Stelle sind zudem ebenfalls explizit mit der zugehörigen Farbe attribuiert. Ein visuelles Beispiel für die Separation zeigt Abbildung 4.13.

Aggregation. Die Aggregation ist die Umkehrung der Separation. Sie findet sich auch exemplarisch in Abbildung 4.14 und dient zur Repräsentation von zwei Formationsnetzen, d.h. Clustern unterschiedlicher Intentionen in einer Stelle des Straßensubnetzes.

Assimilation. Die Transition der Assimilation modelliert die Übernahme von zwei oder mehreren Intentionen zu einer gemeinsamen. Diese Intention kann auch eine neue sein, unabhängig von den ursprünglichen. Voraussetzung für die Assimilation ist eine Stelle vor der Transition, die durch einen Metatoken belegt ist, der zwei oder mehrere Intentionen in einem gemeinsamen Formationsnetz abbildet und in welchem alle modellierten Fahrstreifen ausgenutzt werden. Die Assimilation bildet kompakt die Prozeduren ab, welche zu einem neuen Cluster führen, d.h. die Überprüfung der Attributdistanz, das Anpassen der Intentionen und letztlich das Finden einer neuen gemeinsamen Intention.

Topologieänderung. Ähnlich wie Aggregation und Assimilation ist die Topologieänderung in zwei Richtungen spezifiziert. Die dazugehörige Transition modelliert das Hinzufügen oder das Entfernen von Fahrstreifen. Hierzu werden entsprechende Petrinetzelemente dem bestehenden Formationsnetz angehängt oder entfernt. Das geschieht nach dem Schema der Strukturierung des Formationsnetzes, vgl. hierzu Def. 4.20. Das Anpassen der Elemente bezüglich der Längsausdehnung des Formationsnetzes wird nicht explizit als Topologieänderung modelliert. Dies geschieht direkt auf der Formationsnetzebene .

Rekonfiguration. Bei der Transition zur Rekonfiguration wird dem Formationsnetz in Abhängigkeit der vorliegenden Verkehrssituation vorgegeben, zu welchem Typ von Zielformation sich die Formation zu wandeln hat. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen

1. einer Formation höchster Dichte
2. einer Formation, in der eine räumliche Trennung der Fahrzeuge gemäß ihren Intentionen vorgenommen wurde. Alle Fahrstreifen beherbergen nur eine Intention.
3. einer Formation, in der die Fahrzeuge auf eine andere Fahrstreifenanzahl verteilt werden, sodass wieder eine Formation höchster Dichte eingenommen wird.

Die erste Zielformation wird auch bei einer regulären Fortbewegung vorgegeben. Hierzu werden die Aktionen auf Formationsnetzebene ausgeführt, sofern keine Formation maximaler Dichte vorliegt. Die zweite Zielformation dient insbesondere zur

Modellierung von Auf- und Abfahrten, wo Fahrzeuge unterschiedlicher Intentionen unterschiedliche Fahrstreifen belegen müssen. Die dritte Zielformation dient der Anpassung an unterschiedliche Fahrstreifenanzahlen, ohne dass auf variierende Intentionen Rücksicht genommen wird.

In den folgenden Abschnitten wird eine Modellierung der hier betrachteten Verkehrssituationen vorgenommen, und zwar auf Grundlage der oben beschriebenen Attributrelationen und der Interaktionsrelation.

4.4.2 Modell der Fahrstreifenerweiterung

Eine Fahrstreifenerweiterung entspricht auf der Straßennetzebene einer Struktur von drei Stellen, die über zwei Transitionen mit entsprechenden Richtungskanten der Fahrtrichtung entsprechend miteinander verbunden sind. Die erste Transition modelliert die Aktion für die Topologieänderung auf Formationsnetzebene in Form einer Einbettung. Hierzu wird eine identische Anzahl an Stellen entsprechend der Längsausdehnung an das ursprünglich vorhandene Formationsnetz lateral angehängt, und zwar unter derselben Konvention zur Verknüpfung der Stellen, wie sie in Abschnitt 4.3.1 eingeführt wurde. Die zweite Transition modelliert die Vorwärtsbewegung bzw. Anpassung der Formation. Letzteres wird unter den in Abschnitt 2.2.1 eingeführten Zielen eines Fahrzeugagenten durchgeführt. Ein Beispiel für die Fahrstreifenerweiterung ist in Abbildung 4.11 gegeben. Dargestellt ist dort auf oberster Ebene das Straßennetz, das in diesem Falle eine Fahrstreifenerweiterung abbilden soll. Hierzu dienen zwischen drei Stellen zwei konsekutiv angeordnete Transitionen, welche die Änderungen auf Formationsnetzebene induzieren. Das Objektnetz auf Formationsebene – das Formationsnetz – ist auf Straßennetzebene als Metatoken dargestellt, dessen Änderungen darunter detailliert dargestellt sind. Beginnend bei einer Formation, die zwei Fahrstreifen befährt und die offenbar eine Formation maximaler Dichte gem. Abschnitt 2.2.1 darstellt, schaltet Transition t_{s_1} und bewirkt eine Topologieänderung des Formationsnetzes in Form einer Einbettung, sodass auf Formationsnetzebene nun drei Fahrstreifen abgebildet werden. Anschließend erfolgt das Schalten von t_{s_2} . Dies induziert die Rekonfiguration der Formation zu einer erneuten Formation maximaler Dichte, sodass sämtliche Fahrstreifen seitens des Clusters belegt werden.

Die Visualisierung auf Straßennetzebene dieser diskreten Zustände des Fahrzeugclusters erfolgt mittels des Farbsatzes des Straßennetzes. Bei der Fahrstreifenerwei-

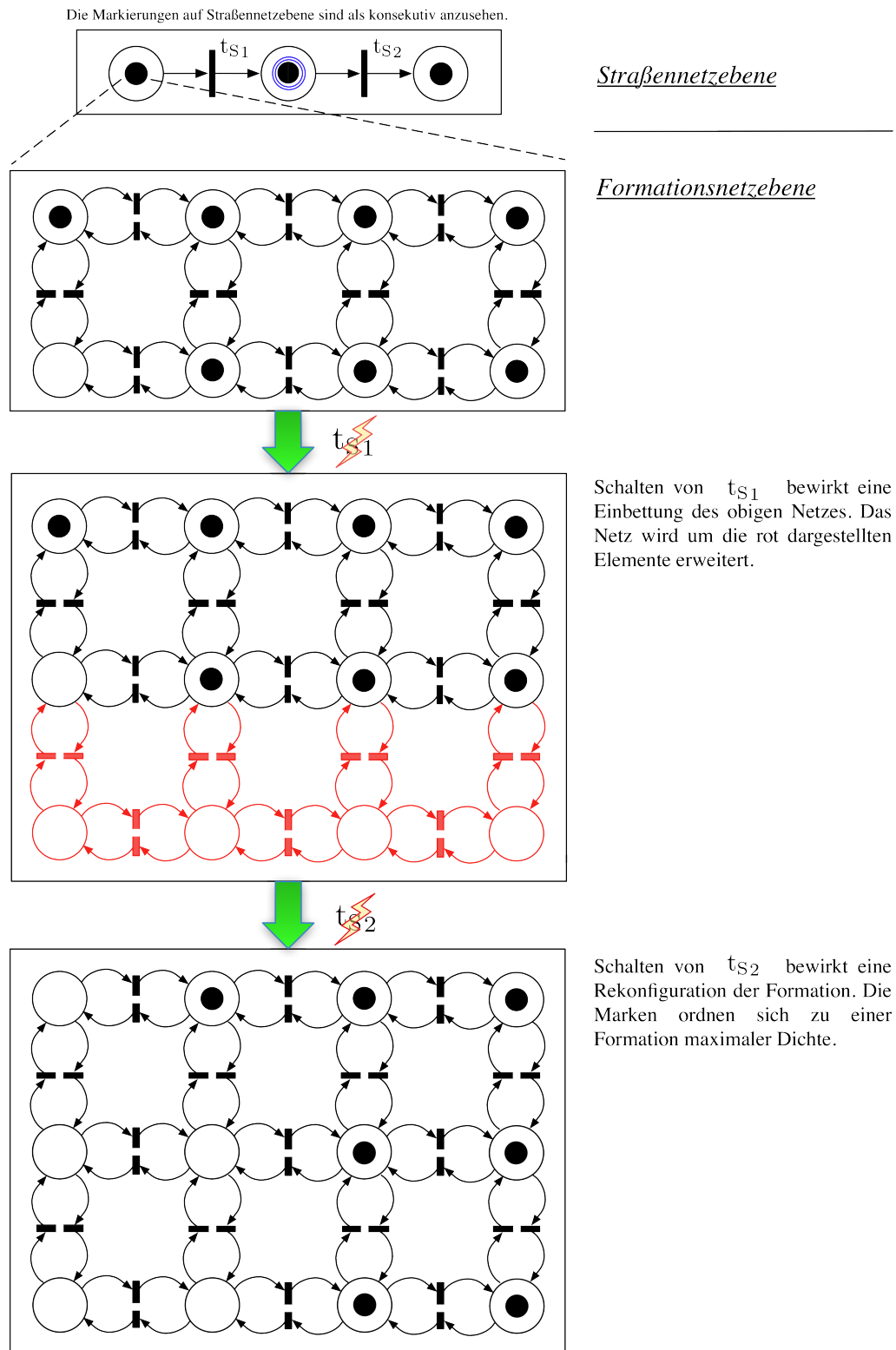


Abbildung 4.11: Prinzip einer Fahrstreifenerweiterung auf Straßen- und Formationsnetzebene

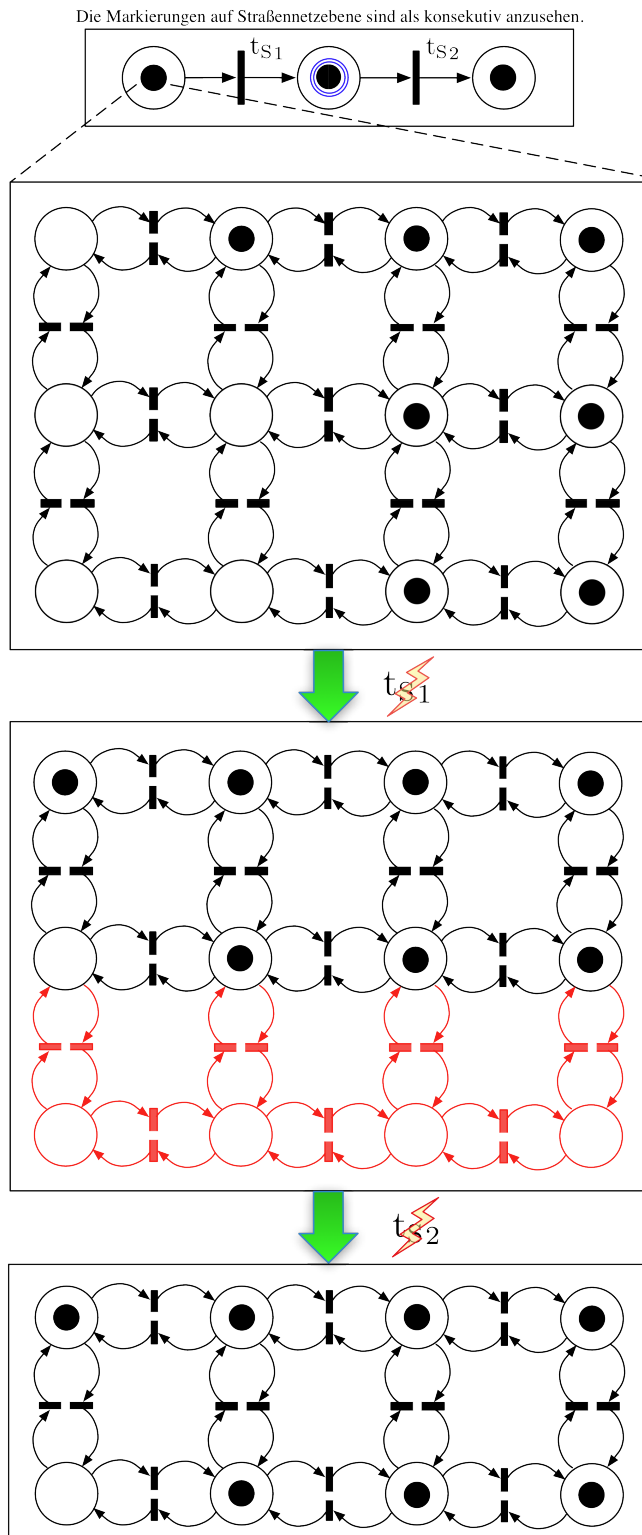
terung entspräche jeweils eine Farbe dem Beibehalten der Formation, der Änderung der Formation sowie der Individualfarbe des Clusters, die sich direkt aus der Fahrzeugklasse ergibt. Die Letztere ist wiederum abhängig von der gewünschten mittleren Geschwindigkeit der dortigen Fahrzeuge. Diese Farben werden zu einem Tupel zusammengefasst, alle möglichen (diskreten) Farbkombinationen bilden daraus letztlich den vollständigen Farbsatz. Zur Vereinfachung der Darstellung wird hier eine Farbe für die Fahrzeugklasse verwendet. Die Änderung des Fahrtwunsches innerhalb des Fahrzeugverbandes, was das Ausscheiden oder die Integration von Fahrzeugen aus dem bzw. in den Clusterverbund bedeutet, wird durch die Veränderung der Farbtiefe abgebildet. Auf Formationsnetzebene wird der Farbsatz zur Differenzierung der Intentionen der Fahrzeuge benutzt. Diese beschränken sich jedoch lediglich darauf, in der Formation zu bleiben, diese zu verlassen oder sich der Formation anzuschließen. Auf Formationsnetzebene kann dies stets durch die Verwendung von zwei Farben kodiert werden, da stets nur zwei Fahrzeuggruppen im betreffenden Netz unterschieden werden müssen.

4.4.3 Modell der Fahrstreifenverengung

Eine Fahrstreifenverengung weist auf Straßennetzebene ebenfalls eine Struktur von drei Stellen auf, die über zwei Transitionen und Richtungskanten miteinander verknüpft sind. Jedoch ist die erstere Transition diejenige, die eine Rekonfiguration der Fahrzeugverteilung auf Formationsnetzebene induziert, während die zweite die Topologieänderung bezüglich des zu entfernenden Fahrstreifens bewirkt. Wie in Abbildung 4.12 dargestellt, entspricht dies einer Restriktion.

4.4.4 Modell der Abfahrt

Eine Abfahrt stellt aus Sicht der jeweils aktuellen Fahrbahn eine räumlich begrenzte Fahrstreifenerweiterung dar. Im Allgemeinen befinden sich die Fahrzeuge, welche die Intention besitzen die Abfahrt zu nehmen, nicht unbedingt auf dem rechten Fahrstreifen. Daher ist für den allgemeinen Fall zunächst die Formation so zu rekonfigurieren, dass die letztgenannten Fahrzeuge sich auf dem rechten Fahrstreifen befinden. Anschließend erfolgt analog zum Schema der Fahrstreifenerweiterung eine Änderung der Formationsnetztopologie. Induziert werden diese Aktionen durch entsprechend attribuierte Transitionen auf Straßennetzebene. Eine Visualisierung



Straßennetzebene

Formationsnetzebene

Schalten von t_{S1} bewirkt eine Rekonfiguration der Formation. Die Marken ordnen sich zu einer Formation maximaler Dichte auf den oberen weiter verbleibenden Fahrstreifen.

Schalten von t_{S2} bewirkt eine Restriktion des obigen Netzes. Das Netz wird um die rot dargestellten Elemente reduziert.

Abbildung 4.12: Prinzip einer Fahrstreifenverengung auf Straßen- und Formationsnetzebene

hierzu ist in Abbildung 4.13 gegeben. Insbesondere wird hier die Nutzung des Farbsatzes auf Straßen- und Formationsnetzebene deutlich, als auch die Interaktionsrelation in der vorliegenden Verkehrssituation, die in der wohldefinierten konsekutiven Zuordnung von Formationsrekonfiguration und -topologieänderung besteht.

Wird zunächst die Straßennetzebene betrachtet, so ändert sich in einem Cluster, der durch einen schwarzen Metatoken modelliert wird, der Fahrtwunsch von einigen Fahrzeugen, die kommende Abfahrt zu nehmen. Der Folgezustand dieses Clusters wird durch eine zweifarbige Marke im Bild dargestellt, die symbolisiert, dass innerhalb des Clusters zwei Fahrzeuggruppen mit unterschiedlichen Intentionen vorhanden sind. Anschließend erfolgt der Fahrstreifenwechsel in der dafür zugehörigen Transition. Letztere wird durch eine Dekomposition in ein transitionsberandentes Petrinetz abgebildet, das immer noch eine Repräsentation der Straßennetzebene darstellt. Die dortige erste Transition induziert eine Rekonfiguration der Formation, sodass die Fahrzeuge mit der Intention abzufahren sich auf dem Fahrstreifen rechts außen befinden. Dies ist im Folgezustand anhand des Metatokens zu erkennen, dessen Bedeutung der linken Hälfte der Abbildung zu entnehmen ist, die der Formationsnetzebene entspricht. Die Metatoken zeichnen sich durch einen besonderen Farbsatz aus, um die einzelnen Zustände des Formationsnetzes auf Straßennetzebene zu codieren und zu visualisieren. Hierbei handelt es sich um eine zweifarbige Marke, deren Farben die unterschiedlichen Intentionen codieren und die pro gefeuerter Transition im transitionsberandeten unterlagerten Straßenpetrinetz um einen äußeren Farbkreis ergänzt wird. Ein zusätzlicher äußerer Farbkreis (in der Abbildung blau dargestellt) stellt die beschriebene rekonfigurierte Formation dar; ein zweiter äußerer Farbkreis stellt das Formationsnetz dar, das um einen Fahrstreifen mittels einer Einbettung ergänzt wurde (Topologieänderung). Die sich anschließende Rekonfiguration der Formation, die die Fahrstreifenwechsel der Fahrzeuge mit der Intention abzufahren beinhaltet, wird durch einen dritten Farbkreis um den ursprünglichen zweifarbigen Metatoken modelliert. Der sich an diesem Zustand anschließende Schritt besteht im Feuern einer Transition zur Topologieänderung. Diese betrifft das Formationsnetz in der Art, indem alle dortigen Transitionen und Kanten entfernt werden, welche die Fahrstreifen der ursprünglichen Autobahn mit denen der Abfahrt verknüpfen. Durch diesen Schritt entstehen zwei Objektnetze, die durch zwei Token unterschiedlicher Farben auf Straßennetzebene dargestellt werden. Hier ist also die Kapazität auf Straßennetzebene abweichend vom regulären Fall größer

als eins.

Die formale Trennung der nun vorhandenen *zwei* Cluster auf Straßennetzebene erfolgt über die Zuordnung eines spezifischen Farbsatzes zu den Stellen, die der Transition *Fahrstreifenwechsel* folgen. Durch zweimaliges Feuern der letzten Transition des Subnetzes *Abfahren* und durch Zuordnung der Farben grün bzw. schwarz zu den vorletzten beiden Stellen erhält jede Stelle nur den für sie bestimmten Farbsatz. Die anschließenden Transitionen modellieren eine reguläre *Fortbewegung* auf Formationsnetzebene.

Besitzt eine Abfahrt mehr Fahrstreifen als hier dargestellt, ist das Formationsnetz entsprechend der obigen Darstellung zu erweitern. Handelt es sich bei der Abfahrt um ein Autobahnkreuz mit unterschiedlichen integrierten Fahrtrichtungen, so sind womöglich zusätzliche Fahrstreifen aufzunehmen und entsprechende Intentionen in Form von Farbsätzen zu modellieren. Dies erfolgt ebenfalls analog zu den obigen Erläuterungen. Die auf der Subebene des Straßennetzes dargelegte Struktur bleibt jedoch stets dieselbe.

4.4.5 Modell der Auffahrt

Eine Auffahrt ist die Umkehrung einer Abfahrt. Dies wird insbesondere bei Betrachtung von Abbildung 4.14 deutlich, bei welcher der Verkehrsfluss von unten nach oben gerichtet ist. Abgesehen von den Kanten, deren Richtung im Vergleich zu Abbildung 4.13 invers ist, ist das Netz strukturell identisch. Allein die Bezeichnungen der Transitionen sind entsprechend der Modellierungsintention angepasst worden. So findet sich von unten nach oben lesend zunächst die Transition *Aggregation* des Subnetzes der Globaltransition *Auffahren*. Gemeint ist damit, die aggregierte Darstellung von zwei unterschiedlichen Clustern – gekennzeichnet durch grüne und schwarze Markenfarbe – innerhalb einer Stelle. Die dortige Stelle des Straßennetzes besitzt also abweichend von den regulären Stellen des Straßennetzes eine Kapazität größer als eins. Anschließend werden beide Objektnetze der Stelle zu einem gemeinsamen Objektnetz integriert (*Aggregation zu einem gemeinsamen Cluster*). Dies geschieht mittels einer Topologieänderung, die entsprechende Transitionen und Kanten hinzufügt. Diese Topologieänderung wird durch die entsprechende Transition auf Straßennetzebene induziert. Das hierdurch entstehende Objektnetz ist durch eine Farbkennzeichnung analog zur *Abfahrt* markiert. Ein zweifarbiger Token – für ein Objektnetz bestehend aus Fahrzeuggruppen von zwei unterschiedlichen In-

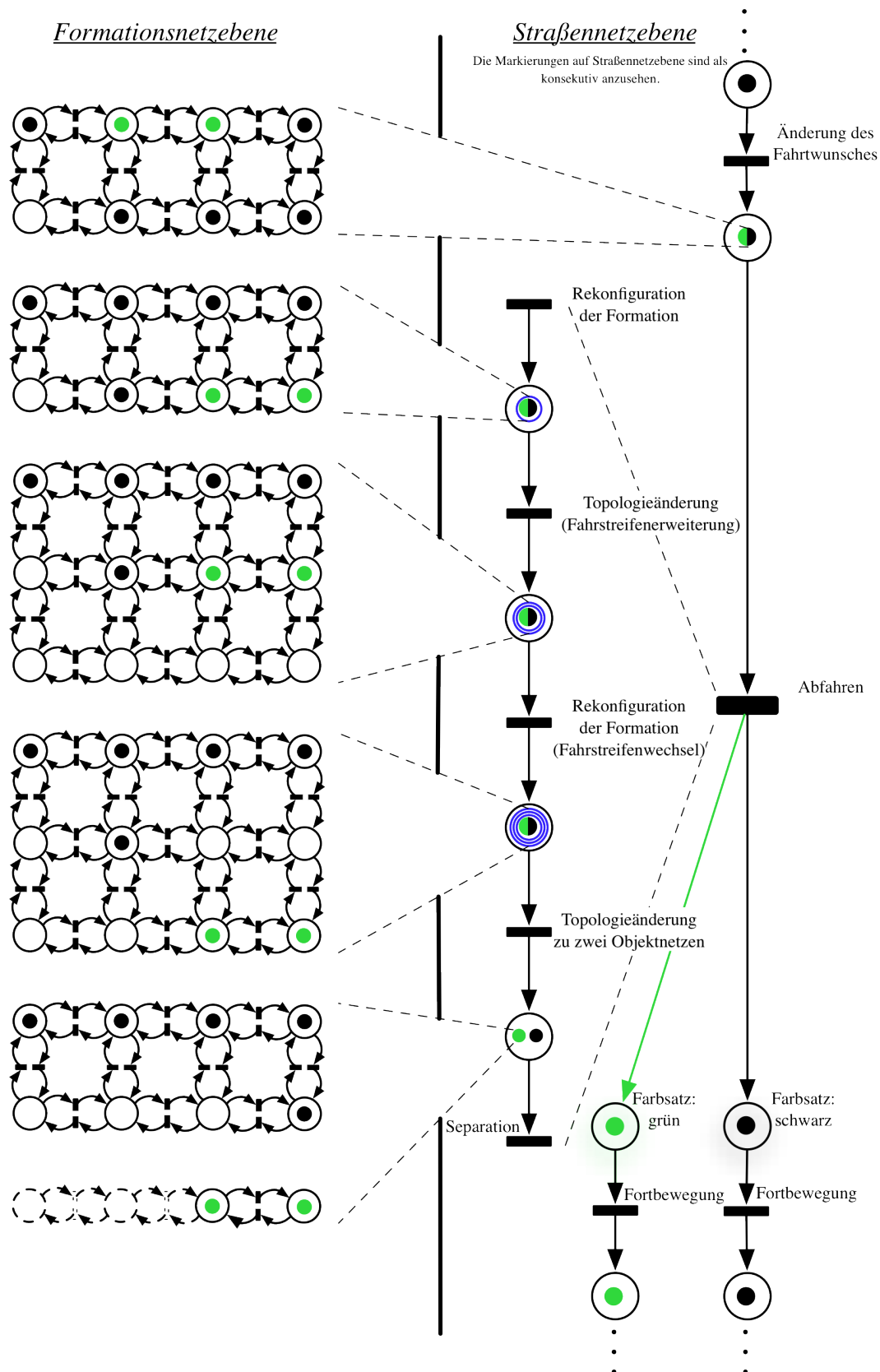


Abbildung 4.13: Prinzip einer Abfahrt auf Formations- und Straßennetzebene

tentionen – weist zwei zusätzliche farbliche Außenringe auf, um darzustellen, dass Fahrzeuggruppen des Clusters identischer Intention jeweils unterschiedliche Fahrstreifen benutzen, die direkt nebeneinander liegen. Im nächsten Schritt, modelliert durch eine Transition vom Typ *Rekonfiguration der Formation*, erfolgt der eigentliche Fahrstreifenwechsel. Das entstehende Objektnetz wird auf Straßennetzebene dadurch repräsentiert, dass die Anzahl der Außenringe um einen Ring reduziert wird. Hierdurch wird gekennzeichnet, dass es sich um einen Cluster handelt, der aus Fahrzeuggruppen unterschiedlicher Intentionen besteht, welche gemeinsame Fahrstreifen verwenden, d.h. nicht mehr pro Gruppe verschiedene. Außerdem sind in diesem Formationsnetz ungenutzte Fahrstreifen vorhanden. Der sich an diesen Zustand anschließende Schritt ist eine Topologieänderung, induziert durch eine entsprechende Transition auf Straßennetzebene. Sie entspricht einer Restriktion des Netzes um die ungenutzten Fahrstreifen. Dies wird in der sich anschließenden Stelle durch einen Metatoken repräsentiert, der wiederum um einen Außenring reduziert wurde. Da formal hiernach immer noch zwei Fahrzeuggruppen unterschiedlicher Intentionen das Formationsnetz okkupieren, ist eine *Assimilation* zu einer gemeinsamen Fahrzeuggruppe identischer Intention notwendig, was durch eine entsprechende Transition induziert wird. Diese *resultierende* Intention ist nicht zwingend identisch mit einem Attribut-Tupel der ursprünglichen Fahrzeugcluster. So kann z. B. eine neue gemeinsame Wunschgeschwindigkeit generiert werden. Daher wird der resultierende Cluster durch die Attribuierung der Token mit einer neuen gemeinsamen Farbe – in der Abbildung 4.14 in der Farbe pink – repräsentiert.

4.4.6 Modell der Fortbewegung

Eine Fortbewegung entspricht einer Transition des Straßennetzes, die für das Abziehen eines Metatokens von der vorherigen Stelle und das Hinzufügen auf die folgende Stelle sorgt. Die Transition modelliert also die Fortbewegung eines Fahrzeugclusters auf dem Straßennetz mittels diskreter Raumsegmente. Desweiteren induziert sie auf Formationsebene eine Rekonfiguration der Formation zu einer Formation maximaler Dichte, sofern diese auf Formationsnetzebene noch nicht vorliegt. Letztere ist dadurch gekennzeichnet, dass die Differenz zwischen der maximalen Anzahl an Fahrzeugen aller Fahrstreifen und der minimalen Anzahl an Fahrzeugen aller Fahrstreifen kleiner oder gleich eins ist, wie es in Definition 2.6 eingeführt wurde, vgl. auch [69]. Ein Cluster, dessen Fahrzeuge in einer *Dichteformation* angeordnet sind,

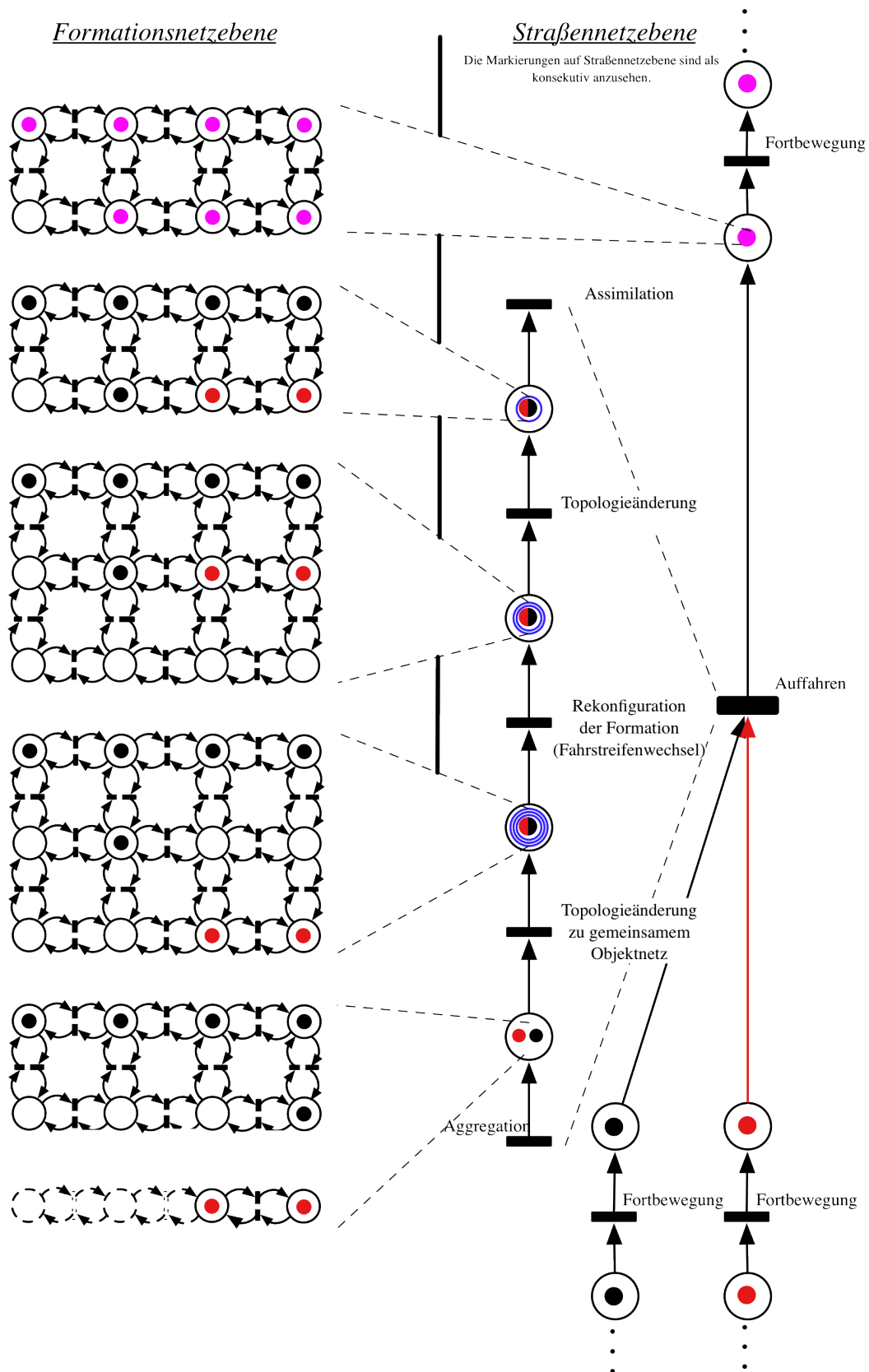


Abbildung 4.14: Prinzip einer Auffahrt auf Formations- und Straßennetzebene

ist beispielhaft in Abbildung 4.15 als Petrinetz dargestellt.

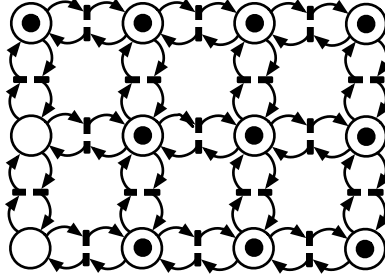


Abbildung 4.15: Beispiel einer Dichteformation auf Formationsnetzebene

4.5 Kommunikationsmodellierung

Die oben beschriebenen mittels Petrinetzen formulierten Interaktionen der Fahrzeuge bedingen den Austausch von Daten untereinander. Ein Datenaustausch mit der Infrastruktur ist auch denkbar, er wird ebenfalls angestrebt, wie im Stand der Forschung beschrieben, jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet, da die Kommunikation auf fahrzeuglokaler Ebene im Fokus liegt, mit dem Zweck, eine Regelbasis zu ermitteln. Es wird davon ausgegangen, dass von jedem Fahrzeug die Daten über die Infrastruktur, wie z. B. die Fahrstreifenanzahl, aus einer geeigneten digitalen Karte ausgelesen werden können. Bei der Modellierung des Datenaustauschs zwischen den Fahrzeugen ist zwischen grundsätzlichen Kommunikationsstrukturen zu unterscheiden. Grundsätzlich können Daten an alle Teilnehmer (*Broadcast*) oder nur an dedizierte Teilnehmer (*Multicast*) gesendet werden. Zudem kann dieser Datenaustausch zyklisch oder ereignisgesteuert erfolgen. Des Weiteren existieren Nachrichten, die eine Bestätigung seitens anderer Teilnehmer erfordern (*Acknowledge*). Dies kann wiederum über Broadcast oder Multicast erfolgen und auch zyklisch in einem Datenvektor mitgesendet bzw. als eigene Nachricht ereignisgesteuert gesendet werden.

Die Unterscheidung zwischen Broadcast und Multicast sowie zwischen zyklischem und ereignisgesteuertem Senden von Nachrichten betrifft insbesondere die Betrachtung der Bandbreite, da durch den Einsatz dieser Modi die genutzte Bandbreite reduziert werden kann. Die Bandbreite des Kommunikationskanals ist für das Verhaltensmodell des Verkehrs jedoch nicht von Bedeutung, sodass ein vereinfachtes

Modell des Datenaustauschs genutzt werden kann. Entscheidend für das Verhaltensmodell sind insbesondere die Berücksichtigung des asynchronen Datenaustauschs, der Latenzzeiten und der zeitvarianten Netzwerktopologie, da diese Effekte die Stabilität von Formationen direkt betreffen. Dies wird durch die häufig verwendete Modellierung des Netzwerks als Graphen ermöglicht, wobei die Teilnehmer als Knoten modelliert werden und die Kanten die Verbindungen zwischen den Teilnehmern repräsentieren. Dies soll auch im Folgenden durchgeführt werden.

Für das Kommunikationsmodell gelten die folgenden Bedingungen. Der zyklische Datenaustausch kann hinsichtlich der Senderate als quasikontinuierlich angenommen werden. Neben den zyklisch auszutauschenden Variablen sind auch ereignisgesteuerte in dem auszutauschenden Datenvektor beinhaltet, der alle Variablen zusammenfasst. Für Daten, die ein Acknowledge benötigen, werden zusätzliche Acknowledge-Flags im Datenvektor vorgesehen. Der Datenvektor besteht in allen Fahrzeugen aus identischen Größen, und es findet ein Broadcast der Daten statt. Gleichzeitig wird die Annahme getroffen, dass die Teilnehmer über eine bidirektionale Verbindung verfügen. Dies hat eine bidirektionale Kommunikationstopologie zur Folge, die mittels eines Graphen abgebildet wird.

Definition 4.25 (Graphentheoretische Kommunikationsmodellierung). Sei $G = (V, E)$ ein Graph mit $V = 1, \dots, p$ einer nichtleeren Menge an Fahrzeugen. Die Menge an Kanten E ist eine geordnete Untermenge des kartesischen Produktes $V \times V$. Ein Paar $(i, j) \in E$ bezeichnet eine Verbindung zwischen Fahrzeug i mit Fahrzeug j . Der Graph G sei bidirektional, das heißt $\forall (i, j) \in E$ gilt auch $(j, i) \in E$. Ein ungerichteter Pfad ist eine Sequenz von Kanten $(i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots$. Zwei Knoten i und j sind verbunden, wenn ein Pfad von i nach j existiert, d.h. $k_1, \dots, k_2 \in E$ sodass $(i, k_1), \dots, (k_n, j)$. Ein bidirektionaler Graph G heißt zusammenhängend genau dann, wenn zwischen jedem Paar $(i, j) \in E$ ein ungerichteter Pfad existiert. Ein Graph $G_s = (V_s, E_s)$ heißt Subgraph von Graph $G = (V, E)$, wenn $V_s \subseteq V$ und $E_s \subseteq E \cap (V_s \times V_s)$.

Ein Kommunikationsgraph kann über seine *Adjazenzmatrix* $\mathbf{A} = (a_{i,j}) \in \mathbb{R}^{p \times p}$ abgebildet werden. Hier ist $i, j \in \{1, \dots, p\}$. Hierbei gilt

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (i,j) \in E \text{ und } i \neq j \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.34)$$

Dieser Ausdruck kann bzgl. des Anwendungsfalles präzisiert werden, indem die Kom-

munikationsreichweite s eingeführt wird. Die kartesischen Koordinaten der Fahrzeuge in der Ebene sind jeweils gegeben durch (x,y) , sodass die Adjazenzmatrix in Abhängigkeit der Reichweite ausgedrückt werden kann durch

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \left| \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right| \leq s \cap i \neq j \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.35)$$

Aus der Adjazenzmatrix lässt sich direkt die *Gradmatrix* (engl. *degree matrix*) ableiten, die für jeden Knoten die Summe der in ihm mündenden und ihn verlassenden Kanten beinhaltet. Sie ist eine Diagonalmatrix und gegeben durch $\mathbf{D} = (d_{i,j})$ mit $i, j \in 1, \dots, p$, wobei

$$d_{i,j} = \begin{cases} \sum_j a_{i,j} & \text{wenn } i = j \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.36)$$

Aus dieser Darstellung ergibt sich die *Laplace-Matrix* (auch bekannt als Kirchhoff-Matrix) mit $\mathbf{L} := \mathbf{D} - \mathbf{A}$, die unter anderem genutzt werden kann, um Spannbäume eines Graphen zu berechnen. Sie wird später bei der Formationsregelung genutzt.

Bei Fahrzeugformationen, die sich in ihrer Zusammenstellung über der Zeit ändern, wird auch durch die Position $(x(t), y(t))$ pro Fahrzeug die Topologie des Kommunikationsgraphen insgesamt zeitvariant, was durch die Einträge der Adjazenzmatrix $\mathbf{A}(t)$ zum Ausdruck kommt.

Mittels der Adjazenzmatrix ist es programmiertechnisch entscheidbar, welche Fahrzeuge untereinander kommunizieren können. Eine Möglichkeit dies programmiertechnisch abzubilden wäre, pro Fahrzeug die Adjazenzmatrix abzufragen, ob ein Kanal zu einem anderen Fahrzeug existiert. Dies ist jedoch implementierungstechnisch nicht optimal, da bei Variation der Fahrzeuganzahl eine Skalierung kaum möglich ist. Besser erscheint hier die Idee, auf rein algebraische Methoden ohne Abfragen zurückzugreifen. Hierzu wird von einem Informationsvektor $\mathbf{x}_i(t)$ pro Fahrzeug i ausgegangen. Die Dimension dieses Vektors wird m benannt und entspricht der Anzahl der ausgetauschten Informationsvariablen, die für jedes Fahrzeug identisch sind. Jedes Fahrzeug sendet diesen Vektor. Dieser Broadcast wird anschließend durch die Zusammenfassung der einzelnen Variablenvektoren zu einem gemeinsamen Vektor repräsentiert, und zwar in Form von

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \dots, \mathbf{x}_p(t)]^T. \quad (4.37)$$

Die Modellierung des Netzwerks geschieht deshalb in zwei Teilen. Der erste Teil basiert auf der Berechnung der Adjazenzmatrix in jedem Zeitschritt. Der zweite Teil ist ein Teil des jeweils betrachteten Fahrzeugmodells und ersetzt einen Entscheidungsalgorithmus. Dieser wird durch eine Matrixmultiplikation ersetzt, die einer Filterung des gemeinsamen Informationsvektors in Abhängigkeit der Adjazenzmatrix entspricht. Hierzu wird eine Filtermatrix \mathbf{F} genutzt, die im *fahrzeugexternen* Teil aus der jeweiligen Adjazenzmatrix berechnet wird.

Es liegt nun eine Adjazenzmatrix $\mathbf{A}(t)$ vor. Die zugehörige Filtermatrix $\mathbf{F}(t)$ berechnet sich mit der Einheitsmatrix \mathbf{I} zu

$$\mathbf{F}(t) = (f_{k,j}(t)) = \mathbf{A}(t) \otimes \mathbf{I}_m. \quad (4.38)$$

Es sei angemerkt, dass der Operator \otimes das Kronecker-Produkt bezeichnet. In jedem Fahrzeugmodell wird anschließend eine Subfiltermatrix \mathbf{F}_i bestimmt, welche die für das Ego-Fahrzeug i jeweils relevanten Zeilen beinhaltet. Formal lässt sich dies wie folgt mathematisch beschreiben

$$\mathbf{F}_i(t) = (f_{k,j}(t)) \forall k = \{(i-1) \cdot m + 1, \dots, i \cdot m\} \cap \forall j. \quad (4.39)$$

Die Empfangsmatrix $\mathbf{X}_{\text{rec},i}$, die ausschließlich die Daten enthält, die das i -te Fahrzeug empfangen hat, wird hiernach bestimmt durch

$$\mathbf{X}_{\text{rec},i}(t) = \mathbf{F}_i(t) \cdot \text{diag}(\mathbf{x}(t)). \quad (4.40)$$

Als Beispiel sei eine zeitinvariante Adjazenzmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

gegeben. Mit der Anzahl von $m = 2$ auszutauschenden Informationsvariablen und

der Einheitsmatrix \mathbf{I}_2 ergibt sich die Filtermatrix zu

$$\mathbf{F} = \left[\begin{array}{cc|cc|cc} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]. \quad (4.42)$$

Durch die abgebildete Segmentierung soll die Struktur dieser Matrix verdeutlicht werden. Die Positionen, welche die Möglichkeit des Datenaustauschs symbolisieren, sind mit einer 1 gekennzeichnet. Diese finden sich in Diagonalblöcken. Die herausgestellten Blockzeilen entsprechen jeweils von oben nach unten ansteigend der Fahrzeugnummer, hier von 1 bis 3. Mittels Gleichung 4.39 werden nun im Kommunikationsteil jedes Einzelfahrzeugmodells diejenigen Zeilen herausgegriffen, die für das jeweilige Ego-Fahrzeug relevant sind. Für das zweite Fahrzeuge des Fahrzeugclusters ergibt sich

$$\mathbf{F}_2 = \left[\begin{array}{cc|cc|cc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]. \quad (4.43)$$

Nach Multiplikation mit der Diagonalmatrix des Informationsvektors

$$\mathbf{x}(t) = [x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}, x_{31}, x_{32}]^T \quad (4.44)$$

wird die Empfangsmatrix $\mathbf{X}_{\text{rec},2}$ zu

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\text{rec},2}(t) &= \mathbf{F}_2 \cdot \text{diag}(\mathbf{x}(t)) = \\ &= \left[\begin{array}{cc|cc|cc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{cccccc} x_{11}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{12}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{21}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{22}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{31}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{32}(t) \end{array} \right] = \\ &= \left[\begin{array}{cccccc} x_{11}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{12}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Hierdurch wird nun die mit Gleichung 4.41 gegebene Kommunikationstopologie erzielt, folglich kann das hier betrachtete zweite Fahrzeugmodell nur die Informationsvariablen des ersten Fahrzeugmodells (x_{11} und x_{12}) algorithmisch weiter verwenden.

Für eine Simulation oder Analyse von Latenzzeiten kann der Vektor \mathbf{x} , der alle Informationsvariablen beinhaltet, in seiner Zusammenstellung so verändert werden, dass für jede gesendete Informationsvariable eine individuelle Latenzzeit τ_{ij} angenommen werden kann, gem. Gleichung 4.46.

$$\mathbf{x}(t) = [x_{11}(t - \tau_{11}), x_{12}(t - \tau_{12}), x_{21}(t - \tau_{21}), x_{22}(t - \tau_{22}), x_{31}(t - \tau_{31}), x_{32}(t - \tau_{32})]^T \quad (4.46)$$

Prinzipiell lassen sich diese Latenzzeiten noch als stochastische Variable auffassen, die mit einer gewissen Streuung um einen individuellen Mittelwert zeitlich variieren. Hierdurch lässt sich der asynchrone Datenaustausch modellierungstechnisch abbilden.

Mit diesem beschriebenen Kommunikationsmodell, das auf einer zeitvarianten Adjazenzmatrix beruht und analyse- und implementierungstechnisch Latenzzeiten berücksichtigt, ist es nun möglich, einen Broadcast der Informationsvariablen bei variierender Kommunikationstopologie und asynchronem Datenaustausch abzubilden. Wie auch das Verhaltensmodell auf Basis von Petrinetzen wird dieses Kommunikationsmodell im sich anschließenden Kapitel genutzt, um ein Verkehrsverhalten fahrzeuglokal zu realisieren, das den gewünschten Kriterien aus Kapitel 2 genügt.

Ob wir es mögen oder nicht,
langsam, aber sicher übernehmen
die Roboter den Job des
Autofahrers.

US-Magazin Popular Science, 1958

Kapitel 5

Regelbasis und Konsensus

Es wurde bis lang das Konzept eines kooperativen Straßenverkehrs auf Basis von Fahrzeugagenten vorgestellt. Anhand der Eigenschaften und Merkmale eines Fahrzeugagenten konnten Ziele an einen kooperativen Straßenverkehr auf Ziele eines Fahrzeugagenten abgebildet werden, die durch Handlungen des Fahrzeugagenten zu verfolgen sind. Das durch diese Handlungen hervorgerufene Verhalten von Fahrzeugagenten in Clustern und seine Umgebung wurde anschließend mittels Petri-netzen und Kommunikationsgraphen modelliert. Diese Beschreibungsmittel werden nun verwendet, um mittels Analyseverfahren und Algorithmen, fahrzeugagentenseitige Entscheidungsmechanismen sowie eine kooperative Regelung zu ermitteln, die das in Kapitel 2 spezifizierte Verhalten realisiert. Diese Methoden liefern also zuletzt eine Regelbasis für fahrzeugseitige Handlungsentscheidungen und realisieren einen Konsensus bezüglich des kooperativen Verhaltens. Hierdurch werden fahrzeugagentenlokale Regeln generiert, welche die Designziele der Konzeption umsetzen. Zunächst wird in den sich anschließenden Abschnitten das Verfahren zur Ermittlung der Regelbasis beschrieben, woran sich die Darstellung zu den Konsens-Algorithmen anschließt.

5.1 Konzept zur Ermittlung einer Regelbasis

Die Nutzung von Petrinetzen als Beschreibungsmittel von Fahrzeugformationen und übergeordneten Netzsegmenten erschließt bestimmte Methoden, die genutzt werden können, um eine Analyse der so modellierten Systeme vorzunehmen. Zu diesen gehören, wie auch in [8] dargestellt, die Ermittlung von grundsätzlichen Eigenschaften

von Netzen, wie Stellen- und Transitionsinvarianten sowie die Erreichbarkeit von Zuständen. Es ist hier das vorrangige Ziel, über die Analyse hinaus, Steuerungen für Formationsnetze zu entwerfen. Hierzu existieren grundsätzlich drei Verfahren:

1. Erreichbarkeitsanalyse durchführen und anschließend die Transitionsfolge zum Zielzustand ermitteln, sowie diese aktivieren [96, S. 438, Verfahren 14.4]
2. Definition von Stelleninvarianten und Ermittlung eines Steuerungsnetzes [96, S. 438 - 440]
3. Erreichbarkeitsanalyse durchführen und anschließende Ermittlung eines Steuerungsnetzes [17, 102]

Hierfür wird das zu steuernde System im regelungstechnischen Sinne als Strecke aufgefasst. Die zu entwerfende Steuerung, formuliert als Petrinetz, heißt Steuerungsnetz. Ein solches wird von den beiden letztgenannten Verfahren im Gegensatz zum Ersten ermittelt. Das Steuerungsnetz besteht aus zusätzlichen Transitionen und Stellen über diejenigen der Strecke hinaus. Mittels Stellen, die Ein- und Ausgangssignale und bestimmte interne Zustände eines Prozessrechners symbolisieren sowie Transitionen, die dortige Prozesse abbilden [102, S. 102 ff.], kann in einem Folgeschritt für den Prozessrechner automatisiert ein implementierungsfähiger Programmcode generiert werden [102, S.118 ff.]. Zu diesen Verfahren sind hier die folgenden grundsätzlichen Punkte zu beachten:

1. Es wird bei diesen Verfahren davon ausgegangen, dass die Strecke in seiner Netztopologie und Anfangsmarkierung invariant ist.
2. Es wird davon ausgegangen, dass die ermittelte Steuerung auf *einem zentralen* Prozessrechner implementiert wird.

Beim zweiten Verfahren werden Stelleninvarianten genutzt, um das Systemverhalten zu spezifizieren, die keine konkreten Zielzustände repräsentieren können, sondern Bedingungen an Stellen koppeln, die für alle Schritte der Prozessbearbeitung gelten. Hiermit lassen sich insbesondere verbotene, d.h. unerwünschte Zustände festlegen. So wird laut [96, S. 438] das Steuerungsziel durch den Ausdruck

$$Lm_k \leq b \quad \forall k$$

formuliert, wobei \mathbf{m}_k den Markierungsvektor des k -ten Schrittes repräsentiert. „Dabei ist \mathbf{L} eine (N_S, N) -Matrix, bei der N die Anzahl der Stellen im Modell der Steuerstrecke ist und N_S die Zahl der Ungleichungsbeschränkungen angibt. \mathbf{b} ist ein N_S -dimensionaler ganzzahliger Vektor. Mit einer derartigen Ungleichung kann man beispielsweise ausdrücken, dass die Stellen p_1 und p_2 nicht gleichzeitig markiert sein sollen,...“[96, S. 439]. Im Gegensatz zu [102] existieren bei diesem Verfahren keine Stellen, die konkret Ein- und Ausgänge repräsentieren. Man geht stattdessen bei diesem Ansatz davon aus, dass überschüssige Marken, die obiger Invarianzbedingung widersprechen, durch das Steuerungsnetz abgezogen werden.

Im betrachteten Fall der Formationsnetze existieren keine im Sinne der Verkehrsregelung verbotenen Zustände, abgesehen von Kollisionen, die jedoch schon durch Begrenzung der Kapazität auf den Wert „Eins“ konzeptionell ausgeschlossen werden.³ Die anderen Ziele, vgl. Kapitel 2, betreffen stationäre Endzustände und können nicht in dieser Form ausgedrückt werden. Außerdem wird in dieser Arbeit kein Steuerungsentwurf für einen zentralen Prozessrechner durchgeführt, sondern der Entwurf einer Regelbasis verfolgt, die auf jedem Fahrzeug als eine verteilte, d.h. dezentrale Steuerung implementiert wird.

Hierbei sind die folgenden Herausforderungen zu berücksichtigen:

1. Es existieren unterschiedliche Umgebungsbedingungen, die durch das Straßennetz formuliert sind.
2. Es existieren generell unterschiedliche Formationen mit variierender Fahrzeuganzahl, sowie unterschiedlichen Fahrzeugverteilungen über den Fahrstreifen.
3. Es existieren in einer Formation unterschiedliche Anfangsbedingungen, in Form von Anfangsmarkierungen des Formationsnetzes bei $k = 0$.

Dies bedeutet, dass pro betrachteter Verkehrssituation sich aufgrund unterschiedlicher Fahrzeuganzahlen Formationsnetze unterschiedlicher Topologie ergeben können. Außerdem sind für jedes dieser denkbaren Formationsnetze die Anfangsmarkierungen variabel. Im Gegensatz zu den oben erläuterten Verfahren handelt es sich hier

³Dies bedeutet, dass aufgrund der Modellbildung keine Regeln abgeleitet werden können, die bei korrekter Perzeption und Kommunikation des Fahrzeugagenten eine Kollision verursachen würden. Die praktische Realisierung dessen erfolgt durch die Überlagerung mit der kooperativen Regelung, deren Geschwindigkeitsänderung proportional zur Distanz benachbarter Fahrzeugagenten ist, was als abstoßende Kräfte interpretiert werden kann. Gleichzeitig ist für die Kollisionsfreiheit anzunehmen, dass die Kommunikation – in den Grenzen der später eingeführten Algorithmen – und die Sensorik hinreichend funktionieren.

also um eine zu steuernde Strecke, die in ihrer Topologie variabel ist und unterschiedliche Anfangsbedingungen haben kann. Hierdurch ist der Suchraum zur Ermittlung einer Steuerung für die Strecke wesentlich größer, als bei den oben beschriebenen Verfahren, die auf Strecken nicht variabler Topologien angewendet werden.

Es verbleibt also als methodischer Ansatz zunächst die Erreichbarkeitsanalyse zur Ermittlung einer Transitionsfolge bei einer hinsichtlich Topologie und Anfangsmarkierung variablen Strecke, die aus einem Formationsnetz besteht, das in ein Straßennetz eingebettet ist. Die zu erörternden Fragestellungen sind also, wie mit der variablen Topologie umgegangen werden kann und wie aus Transitionsfolgen verteilt implementierbare Entscheidungsmechanismen für die Fahrzeuge abgeleitet werden können. Für das Konzept zur Ermittlung einer Regelbasis wurde seitens des Autors in [72] ein Vorschlag erarbeitet, der in Abbildung 5.1 als Kanal-Instanzen-Netz dargestellt ist. Stellen repräsentieren Ressourcen oder Produkte von in Transitionen abgebildeten Prozessen. Begonnen wird bei der Prozedur mit einer definierten Menge an Fahrzeugformationen als Formationsnetze und Umgebungsmodellen in Form von Straßennetzen. Aus diesen Mengen wird nun das jeweils zu betrachtende Formationsnetz erzeugt. Es wird für einen Durchlauf dieser Prozedur immer nur *eine* Kombination aus Formation- und Straßennetz betrachtet. Anschließend wird für das betrachtete Formationsnetz der Erreichbarkeitsgraph erzeugt, der alle erreichbaren Markierungen, d. h. Formationen sowie die verknüpfenden Transitionen abbildet. Mit dem Wissen des Koordinationsziels für die jeweilige Verkehrssituation kann eine spezifische Menge an Zielmarkierungen im Erreichbarkeitsgraph identifiziert werden. Mittels der Suche der kürzesten Wege durch den Dijkstra-Algorithmus [35] lässt sich eine Transitionsfolge ermitteln, die durch eine minimale Anzahl an Interaktionen auf Formationsnetzebene die Zielmarkierung erreicht.⁴ Anschließend wird diese ermittelte Transitionsfolge mittels fahrzeuglokaler Umgebungsparameter analysiert und auf das lokale Verhalten von Fahrzeugen abgebildet. Hierfür werden einer jeweils aktivierten Transition die in diesem Zustand vorliegenden Umgebungsparameter zugeordnet sowie gleichzeitig die vorher durchgeführten Aktionen gespeichert. Diese Zuordnung von bisher geschalteten Transitionen und fahrzeuglokalen Umge-

⁴Die Zeit, die für die jeweilige Interaktion benötigt wird, ist hier nicht explizit mit berücksichtigt. Es ist zukünftig möglich, sie z. B. durch zeitbehaftete Transitionen mit in die Beschreibung zu integrieren. Sie ließe sich jedoch auch über die Einführung von Kantengewichten im Erreichbarkeitsgraphen integrieren, wie in Abschnitt 5.2 dargelegt. Zwingend notwendig erscheint eine explizite Integration der Zeit in die Petrinetzbeschreibung nicht, da dies auch als Aufgabe der Trajektoriengenerierung aufgefasst werden kann.

Umgebungsparametern zu der zu schaltenden Transition und zu dessen Typ werden in Form einer erweiterten Wahrheitstabelle gespeichert, aus der eine Matrix abgeleitet wird, welche die Regelbasis repräsentiert. Dieses Vorgehen wiederholt sich für jede Kombination aus Formationsnetz- und Straßennetzmodell, sodass die Regelbasis sukzessive erweitert wird.

In den sich anschließenden Abschnitten wird auf die Problemstellung der Vielfalt von Verkehrssituationen und der Erreichbarkeitsanalyse eingegangen. Hierauf folgt die Abbildung des Verhaltens auf die fahrzeuglokalen Umgebungsparameter. Das Kapitel schließt mit der Generierung einer exemplarischen Regelbasis.

5.2 Erreichbarkeitsanalyse

Das wesentliche Problem bei der Erreichbarkeitsanalyse liegt in der Zustandsraumexplosion der zu berechnenden Erreichbarkeitsgraphen und deren Vielfalt aufgrund einer großen Anzahl unterschiedlicher Anfangsmarkierungen und Verkehrssituationen. Die zeitnahe Berechnung des Erreichbarkeitsgraphen ist daher insbesondere von der Leistungsfähigkeit des genutzten Computers abhängig. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, erscheint es sinnvoll, die Anzahl der Zustände des Erreichbarkeitsgraphen a priori einzuschränken, indem nicht sinnvolle Transitionen und Stellen ausgeschlossen werden, wie es z. B. auch in [96, S. 438] beschrieben ist. Durch Streichen von verbotenen Transitionen wird ein reduziertes Petrinetz und damit auch ein reduzierter Erreichbarkeitsgraph erzeugt. Außerdem soll für das hier vorliegende Petrinetzmodell des Autobahnverkehrs die Menge an möglichen Anfangsmarkierungen eingeschränkt werden. Dies ist unter anderem in [68, 70] und [74] als Konzept der *Referenzformation* eingeführt worden. Sie stellt für alle betrachteten Formationen hinsichtlich der Längsrelativpositionen eine äquivalente Ausgangssituation dar.

Definition 5.1 (Referenzformation, Dichteformation). Als *Referenzformation* wird ein Cluster von Fahrzeugen bezeichnet, der sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Die vordersten Fahrzeuge der jeweiligen Fahrstreifen haben in Fahrrichtung eine Längsdistanz von null Metern. Sie fahren „auf gleicher Höhe“.
- Die pro Fahrstreifen folgenden Fahrzeuge fahren in jeweils identischem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

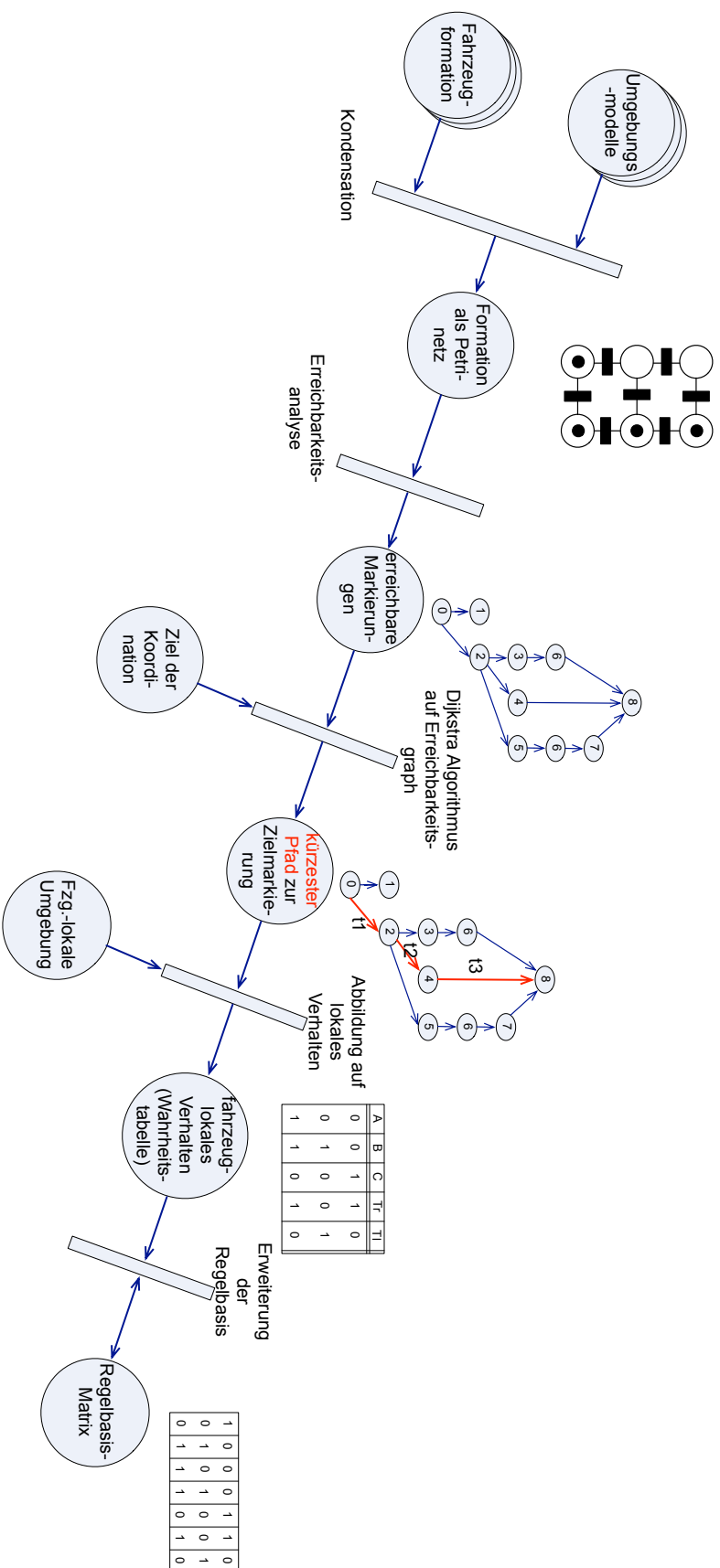


Abbildung 5.1: Konzept zur Ermittlung einer Regelbasis [72]

Die Formation höchster Dichte, *Dichteformation* genannt, ist ein Spezialfall der Referenzformation.

Wie später in Abschnitt 5.5.1 gezeigt wird, lässt sich eine Referenzformation unabhängig von diskreten Entscheidungsmechanismen mittels eines Konsensus der Fahrzeuge erzeugen. Für die Ermittlung der Entscheidungsmechanismen wird daher stets von einer Referenzformation ausgegangen. Für die Einschränkung des Erreichbarkeitsgraphen werden außerdem die Transitionen entfernt, die eine relative Rückwärtsbewegung der Fahrzeuge im Formationsnetz ermöglichen. Die hierdurch veränderte Inzidenzmatrix lässt sich durch Streichen der diesen Transitionen entsprechenden Spalten erzeugen. Die relative Rückwärtsbewegung von Fahrzeugen eines Fahrstreifens wird dann durch die Vorwärtsbewegung der Fahrzeuge der anderen Fahrstreifen bewirkt, was durch die Erweiterung des Formationsnetzes um Stellen in Längsrichtung ermöglicht wird. Abbildung 5.2 zeigt exemplarisch eine Referenzformation in Petrinetzrepräsentation. Der Vorteil einer solchen „Ausgangssituation“ liegt darin, dass das Problem der Pfadsuche zur Zielmarkierung darauf reduziert wird, Fahrzeuge bzw. Marken auf die Fahrstreifen repräsentierenden Subnetze zu verteilen. Des Weiteren werden die Handlungsmöglichkeiten der vordersten Fahrzeuge hinsichtlich der Querbewegung aufgrund der auf eins begrenzten Kapazität verhindert. Dies reduziert ebenfalls die Dimension des Erreichbarkeitsgraphen im Vergleich zu den ursprünglich eingeführten allgemeinen Formationsnetzen.

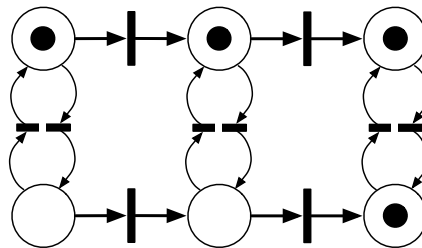


Abbildung 5.2: Beispiel zur Referenzformation eines Formationsnetzes mit reduzierter Transitionsmenge

Nachdem in diesem Sinne eine Klasse von Anfangsmarkierungen spezifiziert wurde, die für die Erreichbarkeitsanalyse herangezogen wird, wird pro Verkehrssituation gemäß dem beschriebenen Konzept der Erreichbarkeitsgraph erzeugt und die jeweilige Zielmarkierung identifiziert. Für den Zwecke der Identifikation der Zielmarkierungen ist es sinnvoll, die in Abschnitt 4.4 eingeführten Verkehrssituationen

nochmals zu betrachten und einer diesbezüglichen Klassifikation zu unterziehen. So wird eine Verkehrssituation wie folgt charakterisiert:

- Die Anzahl der Fahrstreifen wird variiert, und zwar
 - erhöht (Fahrstreifenerweiterung) oder
 - verringert (Fahrstreifenverengung).
- Die Anzahl der Fahrstreifen wird variiert und der Cluster wird
 - getrennt (Abfahrt, d.h. temporäre Fahrstreifenerweiterung) oder
 - erweitert (Auffahrt, d.h. temporäre Fahrstreifenerweiterung)
- Die Anzahl der Fahrstreifen wird *nicht* variiert, aber es erfolgt ein
 - Trennen eines Clusters oder das
 - Erweitern eines Clusters
 - oder es wird regulär in Formation weiter gefahren.

Bei der Klasse der Situationen, bei denen die Fahrstreifenanzahl variiert wird, ist das endgültige Ziel (der quasistationäre Zustand) stets die Erzeugung einer Formation höchster Dichte (vgl. Abbildung 4.15). Dies gilt bei Reduktion als auch bei Vergrößerung der verfügbaren Fahrstreifen. Es werden also Zielmarkierungen, die der Dichtebedingung genügen, für ein äquivalentes Petrinetz mit identischer Markenanzahl jedoch reduzierter oder erweiterter Fahrstreifenanzahl im Erreichbarkeitsgraphen identifiziert. Diese werden stets in der Notation des Petrinetzes der vollständigen bzw. stets größeren Stellenanzahl formuliert, d.h. mit vollständigem Markierungsvektor, sodass die Rekonfiguration der Formation bei der Fahrstreifenverengung im ursprünglichen Netz und bei der Fahrstreifenerweiterung in der Topologie des „Zielnetzes“ stattfindet. Bei der Klasse der Situationen, in denen neben der Fahrstreifenanzahl auch der Cluster verändert wird, entsprechen die Zielmarkierungen ebenfalls pro Cluster dem Typus von Dichteformationen. Jedoch ist im Unterschied zu obiger Klasse bei der Verkehrssituation „Abfahrt“ noch eine Sortierung der Fahrzeuge nach den Intentionen vorzunehmen. Bei der Auffahrt ist Ausgangspunkt der Analyse stets der Zustand des Formationsnetzes nach der Aggregation des Fahrzeugnetzes der anderen Intention, und zwar in Referenzformation. Wird die Anzahl der Fahrstreifen

nicht variiert, ist die Zielformation bei Trennung oder Erweiterung von Clustern die Dichteformation, mit dem Ausgangspunkt der Referenzformation. Durch diese Klassifikation ist zu erkennen, dass nur zwei Typen von Zielmarkierungen existieren: zum einen diejenigen der Dichteformation, sowie zum anderen diejenigen der nach Intentionen sortierten Formationen. Ersterer Typ lässt sich anhand der Differenz der Fahrzeuganzahl zwischen allen Fahrstreifen als kleiner oder gleich eins identifizieren (vgl. Definition 2.6), während Letzterer dadurch im Erreichbarkeitsgraphen identifiziert werden kann, dass sich auf den Stellen der betreffenden Fahrstreifen ausschließlich Marken der betrachteten Intention befinden.

Das Erreichen der Zielzustände lässt sich anhand der im Erreichbarkeitsgraph geschalteten Transitionen bewerten. Dies entspricht der Formulierung von Anforderungen an Zustandsübergänge. Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, wird der Pfad zu einer Zielmarkierung durch die Ausführung des Dijkstra-Algorithmus [35] in Anwendung auf den Erreichbarkeitsgraphen ermittelt. Dieser Pfad, der eine konsekutive Anordnung von erreichbaren Markierungen des zugehörigen Petrinetzes ist, kann anschließend mittels der Inzidenzmatrix in einen entsprechenden Transitionsvektor, d.h. einen Vektor mit konsekutiv zu schaltenden Transitionen, transformiert werden. Der Algorithmus zur Suche des kürzesten Weges bewertet jedoch zunächst jede Verbindung zwischen zwei erreichbaren Markierungen äquivalent. Dies kann jedoch geändert werden, indem die Kanten zwischen zwei erreichbaren Markierungen zusätzlich mit unterschiedlichen Kantengewichten ausgestattet werden. Hierdurch wird es ermöglicht, der Marken- und damit Fahrzeugbewegung bestimmte Vorzugsrichtungen aufzuprägen. Beispielsweise könnten Fahrstreifenwechsel, d.h. Transitionen in Querrichtung, im Erreichbarkeitsgraphen mit höheren Kosten bewertet werden, sofern z. B. durch Statistiken erwiesen wird, dass diese eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit in sich bergen. Somit würden kürzeste Pfade zur Zielmarkierung ermittelt, die aber Fahrstreifenwechselwechsel möglichst ausschließen. Und bei sehr großen Fahrzeugclustern kann es z. B. sinnvoll sein, räumlich lange Aufholmanöver zu vermeiden, da diese eine hohe Beschleunigung der betreffenden Fahrzeuge und damit einen erhöhten Energieverbrauch induzieren würden. Dies entspräche einer mit wachsender Distanz zur in Fahrtrichtung befindlichen Formationsfront ansteigenden Gewichtung der Kanten des Erreichbarkeitsgraphen, die den Transitionen der Längsbewegung entsprechen. Abbildung 5.3 zeigt vier exemplarische Graphen, welche die erreichbaren Markierungen als Knoten M und deren gerichteten Kan-

ten zwischen diesen darstellen. Hierbei ist der Graph in der Abbildung 5.3 a) der ursprüngliche Erreichbarkeitsgraph. Die Kantenbezeichnungen entsprechen hierbei den vergebenen Bezeichnungen der Transitionen. Bei der Ausführung des Dijkstra-Algorithmus auf diesem Graphen wird jede Kante mit dem Kantengewicht eins versehen. Ergebnis ist der exemplarische Pfad im Erreichbarkeitsgraphen, wie es in Abbildung 5.3 b) dargestellt ist. Es ist aus der Kennzeichnung der Kanten in der Abbildung direkt ersichtlich, welche Transitionen zu schalten sind. Soll eine o. g. Bewertung der Zustandsübergänge vorgenommen werden, so wird der ursprüngliche Erreichbarkeitsgraph zu einem Graphen, dessen Kanten zwischen den erreichbaren Markierungen mit speziellen Kantengewichten versehen sind, wie dies exemplarisch in Abbildung 5.3 c) gezeigt ist. Rechts daneben, in Abb. 5.3 d), ist ein kürzester Pfad zur Zielmarkierung M5 rot dargestellt, der auf Grundlage der Kantengewichte bestimmt wurde. Das dazugehörige Formationsnetz mit seiner Anfangsmarkierung ist in Abbildung 5.4 aufgezeigt. Die neben den Transitionsbezeichnungen eingefügten Zahlen sind in rot sowie fett und kursiv dargestellt. Sie entsprechen den eingeführten Kantengewichten der Graphen c) und d) aus Abbildung 5.3.

Das beschriebene Vorgehen soll im Folgenden formal erläutert und zusammengefasst werden. Hierzu werden die Begriffe der Verkehrssituation und der Umgebungsbedingungen genauer spezifiziert.

Definition 5.2 (Verkehrssituation). Eine *Verkehrssituation* wird mit V_{sit_i} bezeichnet, i ist eine fortlaufende Nummer. Die Menge aller auftretenden spezifizierten Verkehrssituationen ist $\{V_{sit}\}$. Eine Verkehrssituation ist stets eine Kombination aus dem jeweils betrachteten, begrenzten Ausschnitt eines Straßennetzes \mathcal{S} mit einem diesbezüglich formulierten Formationsnetz $\mathcal{F}(o, r, \mathbf{m}_{F_0})$, wobei r die maximale Fahrstreifenanzahl, die in der jeweiligen Verkehrssituation auftritt, und o die Anzahl der Raumsegmente pro Fahrstreifen repräsentieren. Die Anfangsmarkierung des Netzes \mathbf{m}_{F_0} ist stets vom Typus der Referenzformation. Die Menge aller betrachteten Verkehrssituationen, für die das Verkehrsverhalten zu spezifizieren ist, ist gegeben durch das kartesische Produkt von der Menge aller betrachteten Umgebungsbedingungen, gegeben durch Ausschnitte des Straßennetzes $\{\mathcal{S}\}$, und der diesbezüglich jeweils formulierten Formationsnetze in Referenzformation $\{\mathcal{F}(r, p)\}$ gemäß

$$\{V_{sit}\} = \{\mathcal{S}\} \times \{\mathcal{F}(r, p)\}. \quad (5.1)$$

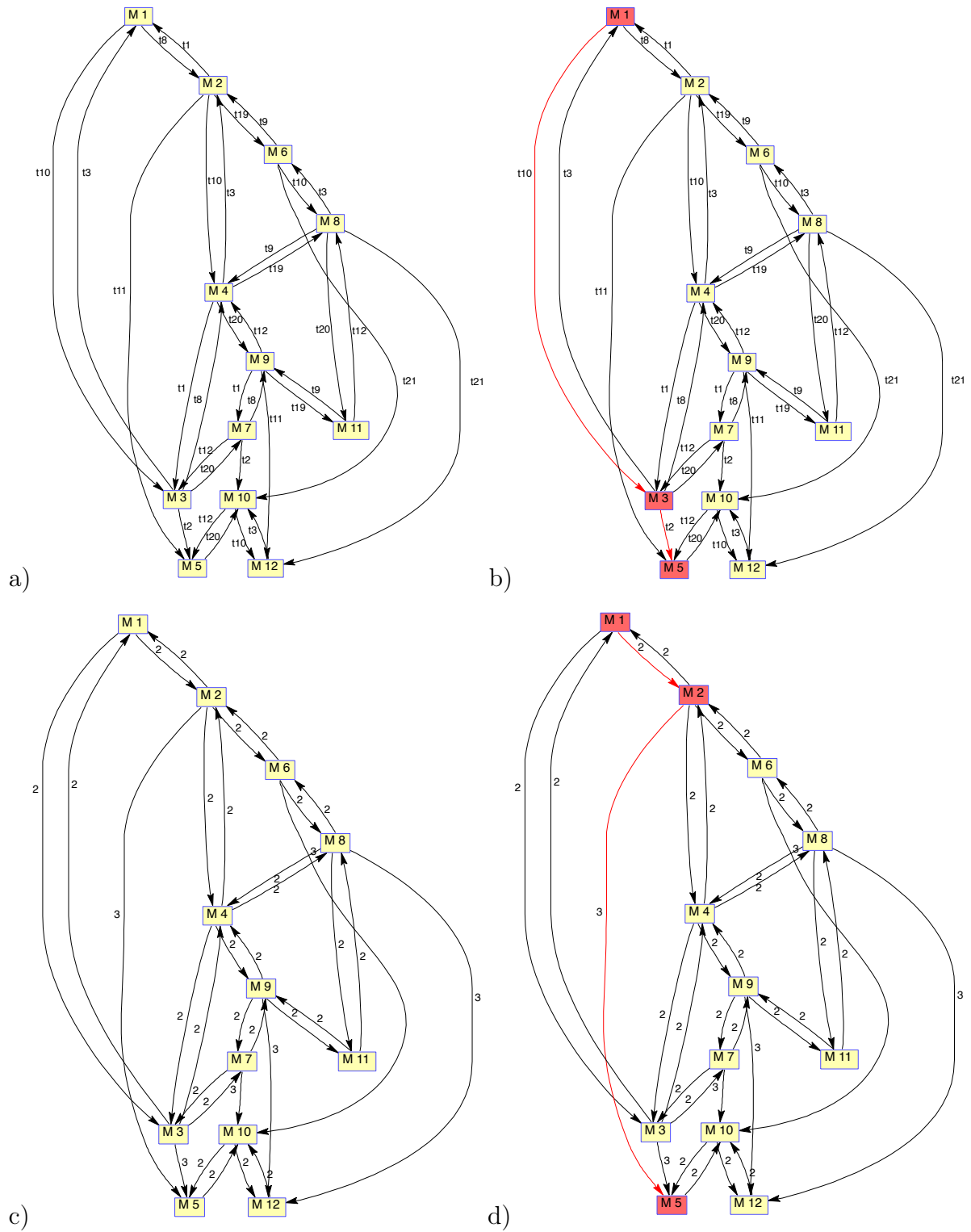


Abbildung 5.3: Exemplarischer Erreichbarkeitsgraph für drei Fahrstreifen, vier Aufenthaltsräume in Längsrichtung und acht Fahrzeuge

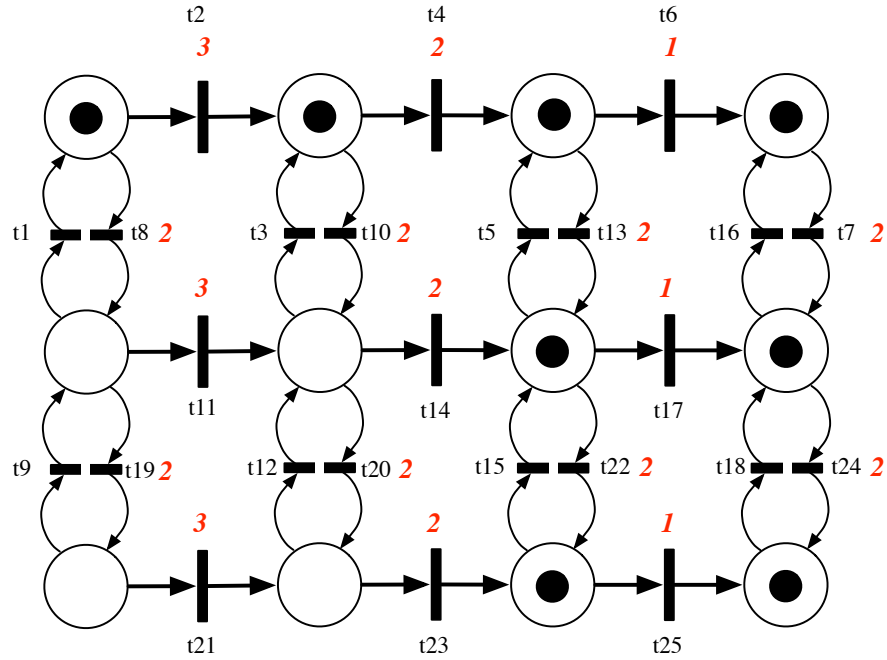


Abbildung 5.4: Formationsnetz zu den exemplarischen Erreichbarkeitsgraphen mit Bezeichnung der Transitionen und den optionalen Kantengewichten im Erreichbarkeitsgraphen

Es sei angemerkt, dass mit dem Binomialkoeffizienten für eine gewisse Fahrzeuganzahl p und eine Anzahl an Fahrstreifen r eine Anzahl von

$$n_{\text{ref}} = \binom{r+p-1}{p} \quad (5.2)$$

möglichen Referenzformationen existiert, welche die möglichen Formationen maximaler Dichte einschließen. Diese Kombination entspricht der Problemstellung der Verteilung von p Fahrzeugen auf r Fahrstreifen. Die Fahrstreifenanzahl r entspricht derjenigen, die vor einer möglichen Änderung der Fahrstreifenanzahl durch das jeweilige Straßennetz \mathcal{S} vorliegt. Die Anzahl an Stellen in Längsrichtung o ergibt sich dann durch die Referenzformation als Maximum an Fahrzeugen über allen Fahrstreifen.

Die Anzahl aller erreichbaren Markierungen n_{RM} in einem Formationsnetz mit r Fahrstreifen, einer maximalen Anzahl an Fahrzeugen von $o = p$ aller Fahrstreifen

und p Fahrzeugen ist *ohne* Einschränkung der Längsbewegung gegeben durch

$$n_{\text{RM}} = \binom{r \cdot o}{p} = \binom{r \cdot p}{p}. \quad (5.3)$$

Diese Kombination entspricht der Problemstellung der Verteilung von p Fahrzeugen (Marken) auf $o \cdot r$ Aufenthaltsräume (Stellen). Existieren z. B. zwei Intentionen innerhalb des Clusters, wie bei den eingeführten Modellen des Straßennetzes, und soll eine Rekonfiguration der Formation nach diesen vorgenommen werden, so existieren pro Kombination aus Gleichung 5.3 bei einer Anzahl von u Fahrzeugen der anderen Intention und $p - u$ der ersten Intention $\binom{p}{u}$ Möglichkeiten die u Marken auf die verfügbaren p Stellen zu verteilen. Die Anzahl aller erreichbaren Zustände bei Vorhandensein von zwei Intentionen, $n_{\text{RM}_{2\text{Int}}}$, in einer Verkehrssituation ergibt sich somit zu

$$n_{\text{RM}_{2\text{Int}}} = \binom{r \cdot p}{p} \cdot \binom{p}{u}. \quad (5.4)$$

Dies kann bei den hier betrachteten Verkehrssituationen, wie sie modelliert wurden, als obere Schranke an zu berechnenden Globalzuständen des Erreichbarkeitsgraphen in Abhängigkeit der maximal auftretenden Fahrstreifenanzahl r und der betrachteten Fahrzeuganzahl p aufgefasst werden. Die Anzahl erreichbarer Zustände einer Verkehrssituation pro Formationsnetz $n_{\text{RM}_{\text{Sit}}}$ kann also eingeschränkt werden auf

$$n_{\text{ref}} < n_{\text{RM}_{\text{Sit}}} < n_{\text{RM}_{2\text{Int}}}. \quad (5.5)$$

Pro Verkehrssituation wird der Erreichbarkeitsgraph berechnet. Wie in diesem Abschnitt eingangs erwähnt, kann dieser zusätzlich mit Kantengewichten ausgestattet werden. Diese Form der *gewichteten Erreichbarkeitsgraphen* wird mit $EG_W(V_{\text{sit}_i})$ bezeichnet.

Definition 5.3 (Gewichteter Erreichbarkeitsgraph). Ein *gewichteter Erreichbarkeitsgraph* ist ein Erreichbarkeitsgraph, erweitert um die Gewichtsfunktion w mit

$$EG_W = \{EG, w\} = \{RM, T_{EG}, w\} \text{ mit } w : T_{EG} \mapsto \mathbb{R}. \quad (5.6)$$

Pro ermitteltem Erreichbarkeitsgraph werden nun die Zielmarkierungen identifiziert, die einer Spezifikation genügen. Diese entsprechen der in dieser Arbeit eingeführten Dichtebedingungen, können jedoch auch der jeweiligen Anwendungsdomäne angepasst werden. Die Zielmarkierungen sind vom Typ der Refrenzformation.

Die Menge der Zielmarkierungen der jeweiligen Verkehrssituation ist eine Unter-
menge der Markierungen, die dem Kriterium einer Referenzformation entsprechen,
d.h. $\{\mathbf{m}_z\} \subset \{\mathbf{m}_{\text{ref}}\}$. Für jede Zielmarkierung wird nun von der jeweiligen Start-
markierung der kürzeste Pfad innerhalb des Erreichbarkeitsgraphen berechnet. Im
Allgemeinen existieren mehrere kürzeste Pfade gleicher Länge zur jeweiligen Ziel-
markierung. Die Menge dieser kürzesten Pfade $\{\mathbf{s}_p(V_{\text{sit}_i}, \mathbf{m}_{z_j})\}$ ist gegeben durch

$$\{\mathbf{s}_p(V_{\text{sit}_i}, \mathbf{m}_{0_i}, \mathbf{m}_{z_j})\} = \text{dijkstra}(EG_W(V_{\text{sit}_i}, \mathbf{m}_{0_i}), \mathbf{m}_{z_j}). \quad (5.7)$$

Die Ausführung des Dijkstra-Algorithmus zur Berechnung der kürzesten Pfade über
dem Graphen wird in dieser Darstellung kompakt als eine Funktion dargestellt.
Ein Vektor \mathbf{s}_p besteht aus konsekutiven Knoten des Erreichbarkeitsgraphen. Aus
Gleichung 5.7 ist ersichtlich, dass ein Erreichbarkeitsgraph für jede i -te Anfangs-
markierung \mathbf{m}_{0_i} zu erstellen ist. Wie bereits betrachtet, ist die jeweilige Anfangs-
markierung ein Element der Menge der Referenzformationen. Die jeweils betrachtete
 j -te Zielmarkierung ist ein Element der in diesem Erreichbarkeitsgraph erreichbaren
Markierungen, die der Zielspezifikation – d.h. hier der Dichtebedingung – genügen.
Für jede dieser Zielmarkierungen ist der Dijkstra-Algorithmus auszuführen, sodass
in Abhängigkeit von Zielmarkierung und Anfangsmarkierung eine Menge kürzester
Wege ermittelt wird. Mittels der Stellen-Transitions-Adjazenzmatrix \mathbf{A}_{S_T} nach De-
finition 4.21, die zunächst genutzt wurde, um die Inzidenzmatrix herzuleiten, kann
aus einem Vektor \mathbf{s}_p die dazugehörige Schrittsequenz (vgl. Def. 4.7) der Transitio-
nen ermittelt werden. Diese Schrittsequenzen $\{\sigma(V_{\text{sit}_i}, \mathbf{m}_{0_i}, \mathbf{m}_{z_j})\}$ können an dieser
Stelle bereits genutzt werden, um Simulationen des Petrinetzmodells durchzuführen.

Existieren nun mehrere in Frage kommende Zielformationen, werden zur Generie-
rung der Regelbasis generell zunächst die Schrittfolgen ausgewählt, welche gleicher
minimaler Länge sind. Bezüglich der Auswahl besteht nun zwischen diesen Schritt-
folgen ein Konflikt, der aufgelöst werden muss, denn Optimalität hinsichtlich des
kürzesten Pfades ist bei all diesen Schrittfolgen gegeben. Um den Konflikt aufzulö-
sen, ist es notwendig, nun eine Schrittfolge so auszuwählen, dass das resultierende
fahrzeugseitige Verhalten in der Verkehrssituation in Abhängigkeit der fahrzeug-
lokalen Umgebungsbedingungen eindeutig ist. Hierzu z.B. kann eine Priorisierung
von Fahrzeugen in Abhängigkeit der Position dienen. Diese Problemstellung wird
im anschließenden Abschnitt 5.3 nach der Einführung fahrzeuglokaler Umgebungs-
bedingungen eingehender diskutiert.

5.3 Abbildung auf fahrzeuglokales Verhalten und Generierung der Regelbasis

Nach der beschriebenen Methode aus Abbildung 5.1 werden anschließend die durch die Erreichbarkeitsanalyse ermittelten Schrittsequenzen $\{\sigma(V_{\text{sit}_i}, \mathbf{m}_{\mathbf{0}_i}, \mathbf{m}_{z_j})\}$ auf fahrzeuglokales Verhalten abgebildet. Wie bereits dargestellt, werden hierzu die Umgebungsbedingungen pro Schritt der jeweiligen Schrittsequenz analysiert. Für diese Analyse ist es notwendig, Umgebungsclassifikatoren einzuführen. Eine Hilfe hierzu ist es, einige Simulationen des Petrinetzmodells mit unterschiedlichen Anfangsmarkierungen und unterschiedlichen Zielmarkierungen durchzuführen, um dort relevante Umgebungsbedingungen zu identifizieren. Das Konzept der Referenzformation erweist sich auch hierbei als sinnvoll, da hierdurch, insbesondere durch fehlende freie Stellen in Längsposition zwischen den Fahrzeugen, die Anzahl relevanter Umgebungsbedingungen reduziert wird.

Grundsätzlich sind die Umgebungsbedingungen bezüglich einer Formation hinsichtlich lokaler und globaler Variablen zu unterscheiden. Als lokale Variable kann eine Größe aufgefasst werden, die direkt ein Fahrzeug (Token) in seinem Aufenthaltsraum (Stelle) betrifft. Globale Variable betreffen den Cluster insgesamt und umfassen somit Daten *aller* Fahrzeuge, so wie es z. B. bei einer Positionsmatrix der Fall wäre, welche die Formation direkt repräsentiert. Von diesen globalen Variablen kann nun in weiteren Granularitätsstufen bis zur lokalen Ebene weiter verfeinert werden. Die Koordination von Fahrzeugen bedingt den Austausch von Daten untereinander. Jedoch ist aufgrund begrenzter Bandbreite dieser Austausch so weit wie möglich zu begrenzen. Ein hypothetischer, wenn auch nicht realisierbarer, Idealzustand läge vor, wenn gar kein Datenaustausch notwendig wäre und jedes Fahrzeug nur seine eigenen fahrzeuglokalen Umgebungsvariablen verwenden würde. Bei der Auswahl geeigneter Variablen für die Identifikation der Umgebungsbedingungen ist also von direkten fahrzeuglokalen Umgebungsvariablen auszugehen und schrittweise der Radius bezüglich der genutzten Informationen hinsichtlich der benachbarten Fahrzeuge zu erweitern und ggf. geeignet zu aggregieren, bis genau jene Informationen jedem Fahrzeug vorliegen, um die Koordinationen erfolgreich durchführen zu können. Diese Diskussion kann in zukünftigen Arbeiten aufgegriffen werden, um die Fragen nach dem Einschluss nicht mit Car2Car-Kommunikation ausgestatteter und nur mit Sensorik zu erfassender Fahrzeuge sowie minimaler Informationsmengen im

lokalen Umfeld zu untersuchen.

Die Variablen werden in dieser Arbeit nur als boolsche Variablen eingesetzt, damit die Entscheidungsmechanismen in Form einer Wahrheitstabelle formuliert werden können. Im Allgemeinen erscheinen auch komplexere Datenstrukturen denkbar. Pro Schritt einer Schrittfolge wird stets genau diejenige Stelle betrachtet, von der ein Token abgezogen wird. Es werden für die Umgebungsbedingungen zwei Typen von Parametern eingeführt: diejenigen, die Eigenschaften von Stellen betreffen und jene, die Eigenschaften von Fahrstreifen betreffen. Die diesbezüglichen fahrzeuglokalen Umgebungsbedingungen lauten:

- Stellenvariable
 - Stelle in Fahrtrichtung vor dem Ego-Fahrzeug frei
 - Stelle in Fahrtrichtung hinter dem Ego-Fahrzeug frei
 - Linke Nachbarstelle frei
 - Nachbarstelle hinten links frei
 - Nachbarstelle vorne links frei
 - Rechte Nachbarstelle frei
 - Nachbarstelle hinten rechts frei
 - Nachbarstelle vorne rechts frei
- Fahrstreifenvariable
 - Ego-Fahrstreifen hat maximale Fahrzeuganzahl absolut
 - Ego-Fahrstreifen hat minimale Fahrzeuganzahl absolut
 - Fahrzeuganzahl anderer Fahrstreifen

Die Variablen bezüglich der Fahrstreifen dienen hierbei dazu, für jedes Fahrzeug die Zielspezifikation zu überprüfen, die bezüglich der Fahrzeuganzahl pro Fahrstreifen formuliert wurde (vgl. Def. 2.6 ff.). Grundsätzlich lässt sich hieran erkennen, ob der Typ der Umgebungsklassifikatoren schon durch die Zielspezifikation eingegrenzt wird. In Hinsicht auf den Kommunikationskanal sollte also versucht werden, die Umgebungsklassifikatoren bereits bei der Zielspezifikation möglichst weitgehend auf lokaler Ebene zu formulieren. Neben der Beziehung zum Kommunikationskanal

selbst wird gleichzeitig die Bedeutung der Umgebungsklassifikatoren für das Kommunikationsprotokoll deutlich, denn durch die Formulierung der Abbildung von Umgebungsklassifikatoren auf fahrzeugseitige Aktionen ergibt sich direkt, welche Daten zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden müssen.

Nach Festlegung der Umgebungsklassifikatoren wird nun pro Schritt jeder Schrittsequenz untersucht, welche Aktion das betreffende Fahrzeug ausführen soll. Die Aktionen sind hierbei durch das Modell der Formationsnetze beschränkt, und zwar auf Längsanpassung und Fahrstreifenwechsel nach links bzw. rechts. Wird der Vektor der Umgebungsklassifikatoren mit ζ_u bezeichnet, dann sei mit $\{\zeta_u\}$ die Menge aller konkreten Vektoren der Umgebungsklassifikatoren in einer Schrittsequenz gegeben. Außerdem ist die Menge der Transitionen des Formationsnetzes in drei Teilmengen zerlegbar, sodass $T_{EG} = \{T_{laengs}, T_{links}, T_{rechts}\}$ gilt. Ein fahrzeugseitiges Verhalten $B(V_{sit_i})$ in einer Verkehrssituation, mit einer Anfangsmarkierung und einer Zielmarkierung ist dann gegeben durch

$$B(V_{sit_i}) : \{\zeta_u(V_{sit_i})\} \rightarrow \{T_{laengs}, T_{links}, T_{rechts}\} \quad \forall \sigma(V_{sit_i}, \mathbf{m}_{0_i}, \mathbf{m}_{z_j}) \ \& \ \forall i, j. \quad (5.8)$$

So lässt sich entsprechend das Verhalten für alle untersuchten Verkehrssituationen zusammenfassen zu $B(V_{sit}) = \{\forall_i B(V_{sit_i})\}$.

Nun ist aus diesem festgestellten Verhalten, das mittels der Erreichbarkeitsanalyse und der Berechnung kürzester Wege im Erreichbarkeitsgraphen ermittelt wurde, eine Regelbasis zu generieren. Die Regelbasis unterscheidet sich von dem in $B(V_{sit})$ zusammengefassten Verhalten darin, dass Mehrdeutigkeiten und Konfliktsituationen hieraus bereinigt wurden. Die Ursache für Mehrdeutigkeiten liegt zum einen an äquivalenten Zielmarkierungen und zum anderen an äquivalenten Pfaden zu einer Zielmarkierung im gewichteten Erreichbarkeitsgraphen. Zielkonflikte können entstehen, wenn ein Tupel an Umgebungsbedingungen unterschiedliche Interaktionen induziert oder Interaktionen durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen hervorgerufen werden. Diese Fälle sind hier entsprechend zu behandeln, um eine konsistente Regelbasis zu erzeugen. Entweder werden aus ingenieurstechnischer Sicht an diesem Punkt zusätzliche Kriterien eingeführt, sodass mit diesen und den in $B(V_{sit})$ Beziehungen eine Regelbasis entsteht. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die mehrdeutigen Fälle bei der Erstellung der Erreichbarkeitsgraphen a priori zu verhindern, z. B. durch eine örtliche oder zeitliche Priorisierung. Bei den hier vorliegenden Typen

von Formationsnetzen entstehen die Mehrdeutigkeiten durch äquivalente Zielmarkierungen dadurch, dass es mehrere Zielmarkierungen geben kann, bei denen die Differenz zwischen maximaler und minimaler Fahrzeuganzahl über den Fahrstreifen kleiner oder gleich eins ist. Eine eindeutige Zielmarkierung gibt es jedoch genau für den Fall, bei dem die Anzahl der Fahrzeuge für jeden Fahrstreifen identisch ist. Das heißt, in diesem Falle reicht es aus, Fahrzeuggruppen zu untersuchen, bei denen die gesamte Fahrzeuganzahl ein ganzzahliges Vielfaches der Fahrstreifenanzahl ist. Dies wird mit dem Modulo-Operator durch $p \bmod r = 0$ ausgedrückt. Mehrdeutigkeiten hinsichtlich der gewichteten Pfade des Erreichbarkeitsgraphen bedeuten letztlich, dass hinsichtlich der Minimierung der Kantengewichtssumme von Start- bis Zielmarkierung mehrere Lösungen existieren. Eine Abhilfe kann es sein, die Gewichtsfunktion w des Erreichbarkeitsgraphen EG_W a priori gerade so zu wählen, dass sich zwingend eindeutige kürzeste Pfade von der Start- zur Zielmarkierung ergeben. Die andere Möglichkeit ist a posteriori – nach vollständiger Ermittlung des möglichen Verhaltens in $B(V_{\text{sit}})$ – eine Auswahl an Markierungen durchzuführen, sodass eine Priorisierung von Fahrzeugen aufgrund der Position in der Formation vorgenommen wird. So kann z. B. bei einer möglichen Interaktion durch mehrere Fahrzeuge dasjenige Handlungspriorität erhalten, das sich im Konflikt zweier Pfade weiter hinten in der Formation befindet. Diese Nachbearbeitung des Verhaltens in $B(V_{\text{sit}})$ wird mit der Funktion Ψ bezeichnet. Sie erzeugt aus der Verhaltensabbildung, die aus der Erreichbarkeitsanalyse ermittelt wird, ein eindeutiges deterministisches Verhaltensmodells mit

$$B_{\leftrightarrow}(V_{\text{sit}}) = \Psi(B(V_{\text{sit}})). \quad (5.9)$$

Die Funktion Ψ kann formal angegeben werden durch

$$\begin{aligned} \Psi : \{ \zeta_u(V_{\text{sit}_i}) \} &\rightarrow \{ T_{\text{laengs}}, T_{\text{links}}, T_{\text{rechts}} \} \quad \forall \{ \tilde{\sigma} \} \quad \text{mit} \\ \{ \tilde{\sigma} \} &\subset \{ \sigma(V_{\text{sit}_i}, \mathbf{m}_{0_i}, \mathbf{m}_{z_j}) \}, \text{ sodass} \\ \Psi^{-1} &\text{ existiert.} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Bei dieser Reduktion der Menge der Schrittsequenzen wird das formulierte Optimierungsziel beibehalten, während gleichzeitig die Abbildung der Umgebungsklassifikatoren auf die Aktionen der Längs- und Querbewegungen eindeutig (bijektiv) und damit invertierbar wird. Die Einschränkung der ermittelten Schrittsequenzen wurde in dieser Arbeit manuell durchgeführt. Eine Automatisierung erscheint mittels

eines Algorithmus zur Merkmalsreduktion zukünftig denkbar. Mittels des zuvor beschriebenen Vorgehens konnte für die Durchführung von Fahrstreifenwechseln die in Tabelle 5.1 dargestellte Entscheidungsmatrix ermittelt werden. Diese Regeln lassen

Tabelle 5.1: Ermittelte Entscheidungsmechanismen als Wahrheitstabelle

Cluster ist in Formation maximaler Dichte	1	0	1	0	1	0	1	0
Ego-Fzg. ist letztes Fzg. auf dem Fahrstreifen mit der maximalen Anzahl an Fzgn.	1	0	0	1	1	0	0	1
Nachbarstelle ist frei	1	0	0	1	1	0	0	1
anderes Fzg. führt Fahrstreifenwechsel durch	1	0	1	0	0	1	0	1
Entscheidung für Ego- Fahrstreifenwechsel	0	0	0	1	0	0	0	0

sich ebenfalls auf die spezielle Verkehrssituation einer Fahrstreifenerweiterung anwenden. Um diesen Regelsatz auf weitere Verkehrssituationen anwenden zu können, muss er um einige Bedingungen erweitert werden:

- Befindet sich der Cluster in einer Fahrstreifenverengung und ist das EgoFahrzeug vorderstes Fahrzeug auf dem wegfallenden Fahrstreifen, so kann es einen Fahrstreifenwechsel vornehmen, falls die Regeln aus der dritten und vierten Zeile aus Tabelle 5.1 erfüllt sind.
- Befindet sich der Cluster in einer Abfahrtsituation, so werden die beiden ersten Zeilen aus Tabelle 5.1 zunächst nicht berücksichtigt, da der Cluster seine Dichteformation erst nach der Abfahrt wieder bildet. Besitzt das Ego-Fahrzeug die Intention abzufahren und befindet es sich noch nicht auf dem Abfahrstreifen, so kann es einen Fahrstreifenwechsel durchführen, falls die Regeln aus der dritten und vierten Zeile aus Tabelle 5.1 erfüllt sind.
- Befindet sich der Cluster in einer Auffahrtsituation und ist das Ego-Fahrzeug vorderstes Fahrzeug auf dem Beschleunigungsfahrstreifen, so kann es auf die Autobahn auffahren, falls die Regeln aus der dritten und vierten Zeile aus Tabelle 5.1 erfüllt sind.

- Existieren mehr als ein Fahrstreifen mit maximaler Fahrzeuganzahl pro Fahrstreifen, so hat beim Fahrstreifenwechsel zum Fahrstreifen mit minimaler Fahrzeuganzahl über den Fahrstreifen dasjenige Fahrzeug Handlungspriorität, das am weitesten in Fahrtrichtung rechts positioniert ist, sofern die Distanz in Querrichtung zwischen den Fahrzeugen identisch ist. Ansonsten hat dasjenige Fahrzeug Handlungspriorität, das die minimale Distanz zum Fahrstreifen minimaler Fahrzeuganzahl besitzt.

Es ist zu erkennen, dass diese direkten Entscheidungsmechanismen ausschließlich den Fahrstreifenwechsel betreffen. Die Längsanpassung ist für die Formationserzeugung, mit dem Ziel eine maximale Dichte zu erzeugen, zur Herleitung diskreter Entscheidungsmechanismen nicht entscheidend; denn es würde sich die Handlungsanweisung an jedes Fahrzeug als ein einfacher Befehl ergeben, so dicht wie möglich aufzufahren, jedoch gleichzeitig den Sicherheitsabstand einzuhalten. Mit einem solchen Mechanismus allein ist jedoch, wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert wurde, keine Formationsstabilität erreichbar. Dies ist nur möglich, wenn die kontinuierliche Fahrzeuglängsdynamik und die Einflüsse des Kommunikationsnetzwerks berücksichtigt werden. In diesem Sinne ergibt sich eine natürliche Separation der Algorithmen für die Quer- und Längsdynamik nach ihren durch die Umgebung induzierten Datentypen. Für die Querdynamik ist ein ereignisdiskreter Entscheidungsmechanismus gefunden worden, letztlich aufgrund der Existenz von diskreten Fahrstreifen. Dagegen wird für die koordinierte Längsdynamik ein kontinuierlicher Algorithmus herangezogen, der insbesondere die Formationsstabilität sicherstellen soll, da hier keine natürliche (räumliche) Diskretisierung vorliegt. Dies erfolgt unter der Annahme einer geeigneten Querregelung für jedes Fahrzeug, die es ermöglicht, dem Straßenverlauf zu folgen. Diese Regelung benötigt jedoch einen konkreten Verlauf der Sollquerposition in Abhängigkeit der Zeit. Dies wird im anschließenden Abschnitt behandelt, woran sich die Darstellungen zu den Konsens-Algorithmen für die Längsdynamik anschließt. Die Realisierung des Kommunikationsprotokolls zwischen den Fahrzeugagenten, das für die sichere Ausführung der Fahrstreifenwechsel erforderlich ist, wird in Anhang A beschrieben.

5.4 Realisierung der Querdynamik

Die Querdynamik zeichnet sich dadurch aus, dass sie durch diskrete Entscheidungen hervorgerufen wird, diese jedoch aus dem Verhaltensmodell noch keine Informationen über das konkrete Verhalten des Fahrzeugzustands über der Zeit beinhalten. In regulären Fahrzeugmodellen wird die Querdynamik häufig als Einspur- oder Zweispurmodell dargestellt, die eine kontinuierliche Dynamik aufgrund von an den Reifen wirkenden Kräften abbilden. Hier wird jedoch ein gewünschtes Verhalten für die Querdynamik im Sinne eines Trajektorienverlaufs definiert, der einer geeigneten unterlagerten Querregelung zugeführt werden kann.

In der vorliegenden Modellierung verändern sich die y -Positionen der Fahrzeuge verändern sich nur während eines Fahrstreifenwechsels, da es sich um ein Koordinatensystem handelt, dessen y -Achse orthogonal zur x -Achse steht, die mit dem Streckenverlauf übereinstimmt. Ist die Zielposition durch die Variable y_{ziel} gegeben, dann kann der gewünschte zeitliche Verlauf durch die Vorgabe einer beliebigen – im Hinblick auf zu vermeidende Überschwinger – aperiodischen Differentialgleichung in jedem Fahrzeug äquivalent vorgegeben werden. Um den Berechnungsaufwand für die exemplarischen Simulationen gering zu halten, wurde hier eine einfache Dynamik der Form

$$\dot{y}_i = \begin{cases} y_{\text{ziel}} - y_i & \text{falls Intention für Fahrstreifenwechsel vorhanden} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.11)$$

angenommen. Der darüber ermittelte Sollverlauf $y_i(t)$ kann anschließend einer geeigneten, unterlagerten Querdynamikregelung zugeführt werden. Für die weiteren Ausführungen wird angenommen, dass ein Fahrstreifen sich mit der Variablen y genau dadurch auszeichnet, dass diese ganzzahlige Werte annimmt. Hierdurch wird die Fallunterscheidung, zu welchem Fahrstreifen die entsprechenden Fahrzeuge gehören, in den sich anschließenden Erläuterungen vereinfacht.

5.5 Integration von Konsens-Algorithmen

Die Nutzung von Konsens-Algorithmen für eine koordinierte Längsdynamik eines Fahrzeugclusters bedingt zunächst grundlegende Betrachtungen zu diesem Typus von verteilten Algorithmen und den Eigenschaften in Abhängigkeit des Kommuni-

kationsnetzwerks hinsichtlich Topologie, Latenz und Asynchronität des Datenaustauschs. Dies wird im ersten Folgeabschnitt dargestellt. Darauf aufbauend werden im zweiten Folgeabschnitt Konsequenzen für die Realisierung aufgezeigt und dargelegt, wie ein geeigneter Konsens-Algorithmus für die Formationsstabilisierung genutzt werden kann.

5.5.1 Grundlagen von Konsens-Algorithmen

Die Beschäftigung mit Konsens-Problemen hat eine lange Tradition im Bereich des verteilten Rechnens. In einem Netzwerk verteilter (Fahrzeug-)Agenten bedeutet der Begriff des Konsens, eine Vereinbarung bezüglich einer oder mehrerer Entscheidungsvariablen zu treffen, die vom Zustand aller Agenten abhängig sind. Ein Konsens-Algorithmus bzw. ein Konsens-Protokoll ist eine Regel zur Interaktion, die den Informationsaustausch zwischen einem Agenten und allen seinen Nachbaragenten und die agenteninterne Informationsverarbeitung spezifiziert, sodass eine Vereinbarung erzielt wird [105]. Es ist nicht notwendigerweise direkt ersichtlich, dass die Problemstellung der Formationsstabilität, die bezüglich der Längsdynamik der Fahrzeuge hier formuliert wurde, direkt als Konsens-Problem ausgedrückt werden kann. Schließlich existieren andere Theoreme, wie z. B. aus dem Bereich der String-Stability [143], die ebenfalls aus Sicht der Formationsstabilität betrachtet werden können. Neben der dortigen kettenartigen Informationskopplung existieren Erweiterungen, die andere Topologien des Informationsaustauschs realisieren [99]. Eine andere Methode wäre auch die Annahme eines Potenzialfeldes um jeden Fahrzeugagenten, sodass sich der Entscheidungsalgorithmus über die Bildung des Gradienten der überlagerten Potenzialfelder ergibt. Gemäß [105] lassen sich diese Methoden jedoch auf Konsens-Problemstellungen zurückführen. Bezüglich der Formationsregelung ergibt sich der Zusammenhang zur Konsens-Problemstellung, wenn als fahrzeuglokales Gütemaß

$$J_i(x) = \sum_{j \in N_i} \|x_j - x_i - r_{ij}\|^2 \quad (5.12)$$

definiert wird, das minimiert werden soll [105]. Hierbei ist x die jeweilige Position und N die Nachbarschaft, d. h. die Agenten mit denen der i -te Agent in der Lage ist zu kommunizieren, und r_{ij} ist die Relativedistanz zum j -ten Fahrzeug. Wird angenommen, dass der i -te Agent stets eine integrierende Dynamik besitzt mit $\dot{x}_i = u_i$ und nutzen die Agenten einen gradientenbasierten Algorithmus zur Minimierung des

kollektiven Gütemaßes $J = \sum_{i=1}^n J_i$ mittels des Protokolls

$$\dot{x}_i = \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i - r_{ij}) = \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) + b_i \text{ mit} \quad (5.13)$$

$$b_i = \sum_{j \in N_i} r_{ij}, \quad (5.14)$$

dann wird jedes fahrzeuglokale Gütemaß minimiert und damit das fahrzeuglokale Ziel erreicht [105, S. 219]. Offenbar wird die Veränderung der eigenen Position \dot{x}_i genau dann gestoppt, wenn alle Distanzen von der Ego-Position x_i zur Nachbarposition x_j genau der gewünschten Distanz r_{ij} entspricht. Somit würde das Ziel jedes einzelnen Agenten erreicht. Konsens bezeichnet hierbei die Konvergenz der fahrzeuginternen Zustandsvariablen bezüglich des Teils $\sum_{j \in N_i} (x_j - x_i)$ aus Gleichung 5.13, die bei Vernachlässigung des Bias b_i identische Werte annehmen würden, sodass $x_j = x_i \forall (j, i)$ gilt. Hieraus ergeben sich die folgenden Fragestellungen:

- Wann wird ein Konsens erzielt, d.h. wovon ist diese Form der Absprache abhängig?
- Welche Endzustände nehmen dann die internen Zustandsvariablen an?

Das Konvergenzverhalten eines solchen Algorithmus ist wesentlich von der Kommunikationstopologie abhängig. Verallgemeinert man die Struktur aus Gleichung 5.13 und betrachtet eine Anzahl von p Fahrzeugen des betreffenden Clusters mit einem Kommunikationsgraphen G und einer zugehörigen Adjazenzmatrix $\mathbf{A} = (a_{ij})$, siehe Abschnitt 4.5, dann lässt sich der sog. *Basis-Konsensalgorithmus* mit

$$\dot{x}_i = - \sum_{j=1}^p a_{ij} \cdot (x_i - x_j) \quad (5.15)$$

formulieren. Wie auch in [118] dargestellt, lässt sich dann die Kollektivdynamik eines solchen Systems mittels der Laplace-Matrix beschreiben als

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L} \cdot \mathbf{x}. \quad (5.16)$$

Die Laplace-Matrix entspricht hierbei $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$ gem. Abschnitt 4.5. Sie kann spezifischer ausgedrückt werden durch

$$\mathbf{L} = \begin{cases} \sum_{j=1}^p a_{ij} & \forall j = i \\ -a_{ij} & \forall j \neq i. \end{cases} \quad (5.17)$$

Aufgrund dieser Struktur hat die Matrix \mathbf{L} stets wiederkehrende Eigenschaften, sofern es sich zunächst um eine *zeitinvariante* Version handelt [118]:

- Der Wert 0 ist *immer* Eigenwert von $-\mathbf{L}$, alle anderen Eigenwerte von $-\mathbf{L}$ haben einen negativen Realteil.
- Der zum Eigenwert 0 gehörige Eigenvektor ist $\mathbf{1}_p$.
- Wenn 0 *einfacher* Eigenwert ist, dann wird ein *Konsens* erzielt mit $|x_i - x_j| \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$.

Eine abgeleitete Fragestellung ist also, wann notwendigerweise null als einfacher Eigenwert vorliegt, sodass ein Konsens erzielt wird. Ein zentrales Theorem besagt, dass null genau dann einfacher Eigenwert ist, wenn die gerichtete Kommunikationstopologie einen Spannbaum aufweist oder die ungerichtete Kommunikationstopologie zusammenhängend ist. Der stationäre Zustand ist gegeben durch die Lösung im Zeitbereich als $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\mathbf{L}t} \rightarrow \mathbf{1}_p \mathbf{v}^T$ mit $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_p]^T$ und $\sum_{j=1}^p v_j = 1$. Das Symbol $\mathbf{1}_p$ bezeichnet hierbei einen p -elementigen Vektor, dessen Elemente alle den Wert eins besitzen. Daraus folgt, dass der stationäre Zustand bei *zeitinvarianter* Topologie gegeben ist durch

$$x_i(t) \rightarrow \sum_{j=1}^p v_j x_j(0) \text{ für } t \rightarrow \infty. \quad (5.18)$$

Ein Spezialfall eines Konsens ist der sog. *gemittelte Konsens* (engl. average consensus), der sich dadurch auszeichnet, dass gerade $v_i = 1/p \forall i$ gilt. Laut [118] wird bei zeitinvarianter Topologie ein gemittelter Konsens genau dann erzielt, wenn bei gerichteter Topologie der Graph balanciert ist, bzw. wenn bei ungerichteter Topologie der Graph zusammenhängend ist.

Nun verbleibt die Frage, was sich ändert, wenn die Topologie zeitvariant ist und wie sich Latenzzeiten auf die Konsensfindung auswirken. Liegt nur eine *zeitvariante* Topologie vor, wird nun davon ausgegangen, dass zeitdiskret verharrende Topologien

existieren, die für eine gewisse *Verharrungszeit* bestehen, d.h. man erhielte stückweise konstante Adjazenz- bzw. Laplace-Matrizen $\mathbf{A}(t)$ und $\mathbf{L}(t)$ mit den Verharrungszeiten $\sigma_j = t_{j+1} - t_j$ und den Umschaltzeitpunkten t_1, t_2, \dots . Ein Konsens wird mit der Lösung im Zeitbereich erzielt als $\lim_{j \rightarrow \infty} e^{-\mathbf{L}(t_j)\sigma_j} \cdot e^{-\mathbf{L}(t_{j-1})\sigma_{j-1}} \dots e^{-\mathbf{L}(t_0)\sigma_0} = \mathbf{1}_p \cdot \boldsymbol{\mu}^T$. Damit die Konvergenz erzielt wird, muss jede einzelne Matrix vom Typ *SIA* sein, d.h. stochastisch, nicht dekomponierbar und aperiodisch. Dies ist dann der Fall, wenn die Menge der Kommunikationstopologien endlich ist, was eine endliche Menge der SIA-Matrizen impliziert und gleichzeitig die Menge der Verharrungszeiten endlich ist. Ist die Menge der Verharrungszeiten unendlich aber beschränkt, dann wird ein Konsens erzeugt, wenn eine unendliche Sequenz aneinander gereihter, einheitlich beschränkter Zeitintervalle existiert und wenn gleichzeitig über jedem dieser Intervalle die Vereinheitlichung aller Kommunikationstopologien einen Spannbaum aufweisen muss.

Für die Betrachtung von Latenzzeiten verbleibt für die Praxis ein Modell des Datenaustauschs relevant, bei dem die Latenzzeit allein diejenige Zustandsgröße beeinflusst, die übertragen wird. In Anlehnung an die übertragenen Informationsvariablen aus Gleichung 4.46 verändert sich der betrachtete Konsens-Algorithmus zu

$$\dot{x}_i = - \sum_{j=1}^p a_{ij}(t)(x_i(t) - x_j(t - \tau_{ij})). \quad (5.19)$$

Gesichertes Erkenntnis ist, dass bei schaltender (zeitvarianter) Topologie ein Konsens erzielt wird, sofern $\tau_{ij} = \tau$ angenommen werden kann. Ist die Topologie *zeitinvariant*, dann beeinflussen Latenzzeiten *nicht* den Konsens [118]. Auch bei asynchroner Kommunikation kann für den Anwendungsfall mit dem Basis-Konsens-Algorithmus sichergestellt werden, dass ein Konsens erzielt wird. Genauso können für zeitvariante Topologien diese Erkenntnisse direkt angewendet werden [158, Theorem 4].

5.5.2 Realisierung der Längsdynamik

Nachdem die Konvergenzeigenschaft des Basis-Konsens-Algorithmus unter verschiedenen Bedingungen zusammengefasst wurden, stellt sich das Problem, wie dieser genutzt werden kann, um die Formation eines Clusters bezüglich der Längspositionen einzuregeln und zu stabilisieren. Als Gütemaß wird hier Gleichung 5.12 herangezogen. Außerdem soll auf den um eine Distanzmatrix erweiterten Konsens-Algorithmus

mit

$$\dot{x}_i = - \sum_{j=1}^p a_{ij}(t)(x_i(t) - x_j(t - \tau_{ij}) - r_{ij}). \quad (5.20)$$

zurückgegriffen werden. Voraussetzung für die Anwendung dieses Algorithmus ist, dass jeder Fahrzeugagent seine Solldistanz r_{ij} zu allen anderen Fahrzeugagenten kennt, deren Informationen er empfängt. Diese Solldistanzen müssten vor der Berechnung der Anpassung \dot{x}_i aus zusätzlichen Informationen gewonnen werden, wie die des Fahrstreifens oder der Fahrzeuganzahl zwischen den vordersten und hintersten Fahrzeugen auf dem Fahrstreifen des j -ten Fahrzeugs. Dies würde zusätzlichen Rechenaufwand bedeuten. Wenn jedoch davon ausgegangen werden kann, dass die Kommunikationsreichweite im betreffenden Cluster so groß ist, dass sich im zeitvarianten Kommunikationsgraph $G(t)$ stets ein Subgraph $\tilde{G} \subset G(t) \forall t$ befindet, der die gewünschten Eigenschaften aufweist, so lässt sich das Konsens-Problem mit diesem Subgraph als *zeitinvariant* bezüglich der Topologie annehmen. Dann kann diese zu nutzende Topologie in Form von \tilde{G} gerade so festgelegt werden, dass sie der Problemstellung der Anwendung entspricht.

Die Bedingungen für das Erzeugen einer Referenzformation können zur Spezifikation des Subgraphen \tilde{G} herangezogen werden. So hat jedes Fahrzeug gerade Kenntnis über die Solldistanzen zum vorausfahrenden und rückwärtigen Fahrzeug. Die vordersten Fahrzeuge benachbarter Fahrstreifen sollen gerade keine Längsdistanz zueinander besitzen. Dann ist der hieraus induzierte Subgraph \tilde{G} gerade wie folgt zu wählen:

- Die vordersten Fahrzeuge kommunizieren zu den jeweils im Fahrstreifen direkten Verfolgern und zu den vordersten Fahrzeugen der anderen direkt benachbarten Fahrstreifen.
- Die hintersten Fahrzeuge kommunizieren jeweils nur mit dem im eigenen Fahrstreifen voraus fahrenden Fahrzeug.
- Die Fahrzeuge, die weder vorderstes noch hinterstes Fahrzeug sind, kommunizieren jeweils mit ihrem direkten Vorder- bzw. Hintermann des eigenen Fahrstreifens.

Unter Annahme bidirektionaler Kommunikation ergibt sich die Kommunikationstopologie als ein Graph, wie er exemplarisch für ein Fahrzeugcluster auf drei Fahrstreifen in Abbildung 5.5 dargestellt ist. Die nummerierten Knoten repräsentieren hierbei

die Fahrzeuge, während die Kanten eine bidirektionale Kommunikation zwischen den Fahrzeugen symbolisieren. Die zu diesem Graphen gehörende Adjazenzmatrix ist in Gleichung 5.21 angegeben.

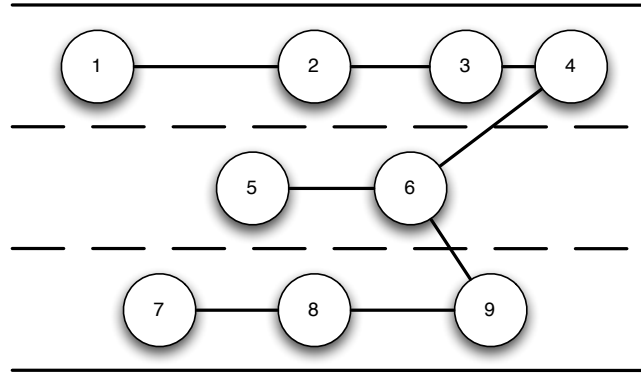


Abbildung 5.5: Beispiel eines Graphen für die induzierte Kommunikationstopologie

$$\mathbf{A}_{\text{Kom.}} = \left[\begin{array}{cccc|cc|ccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right] \quad (5.21)$$

Die Adjazenzmatrix dieses Typus von Graphen hat eine stets wiederkehrende Struktur, die starke Ähnlichkeit mit der in Definition 4.17 eingeführten Stellenadjazenzmatrix besitzt. In Abschnitt 4.3.1 wurde gezeigt, dass die dort eingeführte Stellenadjazenzmatrix selbst eine Block-Toeplitz-Matrix ist, vgl. Definition 4.20, bestehend aus der Fahrstreifenadjazenzmatrix und der sog. Nebenfahrstreifenadjazenzmatrix. Der strukturelle Unterschied zwischen der hier zu nutzenden Kommunikationsadjazenzmatrix und der dortigen Stellenadjazenzmatrix liegt in der Nebenfahrstreifenadjazenzmatrix, da hier nur eine Untermenge der Knoten im Vergleich zu Abschnitt 4.3.1 zwischen den Fahrstreifen über Kanten verknüpft sind. Die Tatsache, dass die Knoten hier direkt Fahrzeuge und nicht mögliche Aufenthaltsräume reprä-

sentieren, hat zur Konsequenz, dass die Toeplitz-Matrizen, welche die Verknüpfung der Knoten eines Fahrstreifens symbolisieren, individuell pro Fahrstreifen zu formulieren sind, da die Anzahl an Knoten über den Fahrstreifen im Gegensatz zu den eingeführten Formationsnetzen nicht konstant ist. Außerdem sind die Verknüpfungen der Knoten zwischen den Fahrstreifen, die bei den eingeführten Formationsnetzen als *Nebenfahrstreifenadjazenz* eingeführt wurden, aus demselben Grunde keine Einheitsmatrizen mehr. Stattdessen sind dies Matrizen, bei denen das letzte Element der letzten Zeile genau den Wert eins hat, während alle anderen Elemente den Wert null haben. Dies erkennt man in Gleichung 5.21, dessen Kommunikationsadjazenzmatrix mit dem Graphen aus Abbildung 5.5 assoziiert ist und für dessen Kantengewichte $a_{ij} = 1\forall(i,j)$ angenommen wurde.

Es ist zu erkennen, dass Graphen, die mit den oben dargestellten Bedingungen aufgebaut werden, in jedem Fall zusammenhängend sind, weil sie über ungerichtete Kanten verfügen, d.h. die Kommunikation zwischen den Fahrzeugagenten bidirektional ist. Dies hat zur Folge, dass in jedem Fall ein Konsens mit dem Algorithmus aus Gleichung 5.20 erzielt wird, und zwar auch bei asynchronem Datenaustausch und unter Einfluss von Latenzzeiten. Voraussetzung hierfür ist, dass jedoch das Kommunikationsmittel sicherstellt, dass der Kommunikationsradius pro Fahrzeug des Clusters stets so groß ist, dass ein Graph G existiert, sodass der hier induzierte Graph \tilde{G} ein Subgraph von G ist. Es wird davon ausgegangen, dass dies gemäß IEEE 802.11p mit den Reichweitenspezifikationen von 1000 Metern nach vorn und hinten sowie 100 Metern jeweils zur Seite erfüllt wird.

Damit nun stets eine solche Kommunikationstopologie erzeugt wird, ist es notwendig, den Konsens-Algorithmus in Abhängigkeit der Position des jeweils betrachteten Ego-Fahrzeugs im Fahrstreifen aufzuteilen, wie es nachfolgend beschrieben wird. Diese Aufteilung entspricht einer Informationsfilterung von gesendeten Daten des übergeordneten Kommunikationsgraphen G . Es sind aufgrund der zu induzierenden Kommunikationstopologie für unterschiedliche Fälle bestimmte Nachbarschaften an Fahrzeugagenten zu definieren, deren Daten ausgewertet werden. Die gewünschte Distanz zu den Nachbarschaftsfahrzeugen eines Fahrstreifens wird mit d bezeichnet. Die Position in Längsrichtung wird stets mit x bezeichnet, die Position der Fahrstreifen wird mit y bezeichnet. Ganzzahlige y bedeuten, dass sich das Fahrzeug exakt auf einem Fahrstreifen befindet. Daher werden benachbarte Fahrstreifen durch das Inkrement bzw. Dekrement von einem ganzzahligen y bezeichnet. Die

Fallunterscheidung ist wie folgt durchzuführen:

1. Das Ego-Fahrzeug i ist letztes Fahrzeug des Fahrstreifens, d.h. es gilt

$$x_i < x_j \forall j \neq i \cap y_i = y_j. \quad (5.22)$$

Dann ist die Nachbarschaft des Egofahrzeugs \mathcal{N}_i gegeben durch die ein-elementige Menge

$$\mathcal{N}_i = \left\{ j \mid j = \min_j (x_j - x_i) \cap y_j = y_i \right\}. \quad (5.23)$$

Und die Distanzmatrix ist gegeben durch

$$\mathbf{r} = (r_{ij}) = -d. \quad (5.24)$$

Der Konsens-Algorithmus, den das i -te Fahrzeug ausführt, wird mit

$$\dot{x}_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_i - x_j) + r_{ij} \quad (5.25)$$

beschrieben.

2. Das Egofahrzeug ist Führungsfahrzeug seines Fahrstreifens, d.h. es gilt

$$x_i > x_j \forall j \neq i \cap y_i = y_j. \quad (5.26)$$

Dann ist die Nachbarschaft des Fahrstreifenführungsfahrzeugs gegeben durch die Vereinigung der ein-elementigen Menge \mathcal{W}_i des Fahrzeugs, das dem Führungsfahrzeug direkt folgt, mit der Menge \mathcal{U}_i der Führungsfahrzeuge auf den benachbarten Fahrstreifen:

$$\mathcal{N}_i = \mathcal{W}_i \cup \mathcal{U}_i \quad (5.27)$$

$$\mathcal{W}_i = \left\{ j \mid j = \min_j (x_i - x_j) \cap y_j = y_i \right\} \quad (5.28)$$

$$\mathcal{U}_i = \{k \mid (x_k > x_r \forall r \neq k \cap y_k = y_r) \cap (y_k = y_i + 1 \cup y_k = y_i - 1)\}. \quad (5.29)$$

Die Distanzmatrix betrifft allein die Menge \mathcal{W}_i mit

$$\mathbf{r} = (r_{ij}) = d . \quad (5.30)$$

Der Konsens-Algorithmus, den das i -te Fahrzeug dann ausführt, lautet

$$\dot{x}_i = - \sum_{j \in \mathcal{W}_i} a_{ij}(x_i - x_j) + r_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{U}_i} a_{ij}(x_i - x_j) . \quad (5.31)$$

3. Das Egofahrzeug ist einziges Fahrzeug seines Fahrstreifens, d.h. es gilt

$$\nexists x_j \text{ mit } y_i = y_j \cap j \neq i. \quad (5.32)$$

Dann ist die Nachbarschaft dieses Fahrzeugs gegeben durch die Menge der Führungsfahrzeuge der benachbarten Fahrstreifen mit

$$\mathcal{N}_i = \{k | (x_k > x_r \forall r \neq k \cap y_k = y_r) \cap (y_k = y_i + 1 \cup y_k = y_i - 1)\} . \quad (5.33)$$

Der Konsens-Algorithmus, den das Ego-Fahrzeug i dann ausführt, ist gegeben durch

$$\dot{x}_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(x_i - x_j) . \quad (5.34)$$

4. Das Egofahrzeug befindet sich zwischen zwei Fahrzeugen, d.h. die oberen Bedingungen sind nicht erfüllt und die Nachbarschaft ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_i &= \{n, m\} \text{ mit} \\ n &= \min_n(x_i - x_n) \cap m = \min_m(x_m - x_i) \cap y_n = y_i \cap y_m = y_i . \end{aligned} \quad (5.35)$$

Die Distanzmatrix ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= (r_{ij}) \text{ mit} \\ r_{ij} &= d \quad \text{für } i = n \cap j = m \\ r_{ij} &= -d \quad \text{für } i = m \cap j = n \\ r_{ij} &= 0 \quad \text{sonst.} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Dann ist der vom Egofahrzeug i ausgeführte Konsens-Algorithmus

$$\dot{x}_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(x_i - x_j) + r_{ij}. \quad (5.37)$$

Durch die Auswahl der jeweiligen Fahrzeugnachbarschaft wird stets die zuvor erläuterte Kommunikationstopologie mit \tilde{G} erzielt. Die Aufteilung in einzelne Konsens-Algorithmen ist aufgrund der pro Nachbarschaftsmenge unterschiedlichen Distanzmatrizen notwendig. Von der Struktur ändert sich der Konsens-Algorithmus nicht, sodass immer noch Gleichung 5.20 gilt. Die Konvergenz kann auch über die Wahl der Parameter a_{ij} , d.h. der Kantengewichte im Graphen \tilde{G} , beeinflusst werden. Für die späteren Simulationen wurden diese zunächst zu eins gewählt.

Die durch den Konsens-Algorithmus jeweils berechneten Geschwindigkeiten $v_i = \dot{x}_i$ werden der ausgehandelten Geschwindigkeit des Clusters wie folgt überlagert:

$$v_{i_d} = v_{\text{cluster}}(d) + v_i. \quad (5.38)$$

Die Geschwindigkeit $v_{\text{cluster}}(d)$ kann zwischen den Fahrzeugen ebenfalls mittels eines Konsens-Algorithmus ermittelt werden. Gleichzeitig ist zu beachten, dass diese Geschwindigkeit abhängig von der Solldistanz d zu wählen ist. Bei der Wahl des Standard-Konsensus würde sich der Mittelwert der einzelnen Fahrzeuggeschwindigkeiten ergeben. Eine andere Möglichkeit ist, dass hier eine gewichtete mittlere Geschwindigkeit erzeugt wird, indem die Fahrzeugagenten einen nach Fahrzeugklasse variierenden Gewichtungsfaktor auf die Entscheidungsfindung aufweisen. Hierzu wäre der Algorithmus mit dem individuellen Gewichtungsfaktor γ_i wie folgt zu erweitern:

$$\dot{v}_{\text{cluster}_i} = - \frac{1}{\gamma_i} \sum_j a_{ij}(v_{\text{cluster}_i} - v_{\text{cluster}_j}). \quad (5.39)$$

Die einfachste Möglichkeit besteht darin, dass für den jeweiligen Cluster eine definierte Sollgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Distanz fest implementiert wird und diese nicht über das Funknetzwerk dynamisch ermittelt wird. Dieses Verfahren bezüglich der Sollgeschwindigkeit wurde für die später dargestellten Simulationen realisiert.

Die somit erzeugten Verläufe von v_{i_d} dienen nun als zeitparametrierte Sollgrößen für eine unterlagerte Längsdynamikregelung eines Fahrzeugagenten. Mit den darge-

stellten Möglichkeiten kann der Verlauf über der Zeit angepasst werden. In Anwendung auf das erwünschte Verkehrsverhalten übernimmt der Konsens-Algorithmus also die folgenden Aufgaben: Er dient der Erzeugung von Referenzformationen und damit auch von Formationen höchster Dichte. Außerdem sichert der Algorithmus die Stabilität der Formation und sorgt damit gleichzeitig für die Beibehaltung der Kommunikation über das Ad-Hoc-Netzwerk.

Die Technik von heute ist das Brot
von morgen – die Wissenschaft von
heute ist die Technik von morgen.

Richard von Weizsäcker

Kapitel 6

Implementierung und Simulation exemplarischer Verkehrssituationen

Bisher wurden Beschreibungsmittel eingeführt und erweitert, um die Problemstellung eines kooperativ geregelten Straßenverkehrs zu modellieren. Diese Modellierung wurde in mathematischer Formalisierung mittels Petrinetzen und Kommunikationsgraphen durchgeführt, sodass die Erreichbarkeitsanalyse und Konsens-Algorithmen nach Adaption oder Erweiterung genutzt werden konnten, um verteilte Algorithmen zu erhalten, die integriert in Fahrzeugagenten das spezifiziertere kooperative Verkehrsverhalten realisieren. In diesem Kapitel soll erläutert werden, welche Entwicklungs- und Simulationswerkzeuge für diese Zwecke entwickelt und angewendet wurden. Hierbei handelt es sich zum einen in Abschnitt 6.1 um eine Entwicklungsumgebung für die Modellierung von Verkehrssituationen mit Hilfe von Petrinetzen. Hiermit lässt sich eine Erreichbarkeitsanalyse durchführen und eine Regelbasis generieren. Das so ermittelte Verkehrsverhalten lässt sich ebenfalls mit einer Visualisierung in Petrinetznotation beobachten. Zum anderen handelt es sich in Abschnitt 6.2 um ein Programm, welches dazu dient, das realisierte Verkehrsverhalten in Form von Fahrzeugagenten zu simulieren, die über ein Funknetzwerk kommunizieren. Die Programmierung wurde in Matlab bzw. Simulink durchgeführt.

6.1 Werkzeug zur petrinetzbasierten Verkehrsmodellierung und für den Entwurf von Entscheidungsmechanismen

Die Anforderungen an das Werkzeug zur petrinetzbasierten Verkehrsmodellierung und den Entwurf von Entscheidungsmechanismen orientieren sich an der in Kapitel 4 angegebenen Nomenklatur und den dazugehörigen Definitionen. Die Programme ermöglichen, Straßennetze in Form von Petrinetzen auf Basis der in Kapitel 4 modellierten Situationen zu konfigurieren und Fahrzeugcluster als Formationsnetze in dem zugehörigen Straßennetz mit seinen Interaktionen zwischen Fahrzeugen zu simulieren. Die Rekonfigurationen ergeben sich hierbei aus vorher ermittelten Schaltfolgen von Transitionen im Formationsnetz, die vor der Simulation des Verkehrsverhaltens mit einer Erreichbarkeitsanalyse der jeweiligen Verkehrssituation ermittelt wurden. In Abbildung 6.1 ist die entsprechende Programmstruktur in Form der in Matlab erstellten Skript-Dateien dargestellt. In der Datei *Straßenmodell.m* wird zunächst abgefragt, wie viele und welche Verkehrssituationen im zu erzeugenden Straßennetz abzubilden sind. Der Benutzer hat hierbei die Auswahl aus regulärer Fortbewegung, Fahrstreifenerweiterung, Fahrstreifenverengung, Abfahrt und Auffahrt. Die Fahrstreifenerweiterung und Fahrstreifenverengung erfolgen hierbei jeweils immer um genau einen Fahrstreifen. Nachdem diese Situationen abgefragt wurden, die das Straßennetz spezifizieren, wird der Nutzer darum gebeten, die Gruppe an Fahrzeugen zu spezifizieren, die sich darin fortbewegt. Nach der Konfiguration ist seitens des Benutzers das Skript *Vekehr.m* aufzurufen, das eine Erreichbarkeitsanalyse der Formationsnetze pro Verkehrssituation und anschließend die Optimierung hinsichtlich der Zielformationen und kürzesten Wege im Erreichbarkeitsgraphen durchführt. Hierzu dienen die entsprechend aufgerufenen Unterprogramme, die in Abbildung 6.1 dargestellt sind und die jeweils mit variierenden Parametern die Programme zur Erzeugung des Erreichbarkeitsgraphen (bei Bedarf mit Visualisierung) und des Dijkstra-Algorithmus aufrufen. Die ermittelten Schaltfolgen auf Formationsnetzebene und deren zugehörige Umgebungsparameter werden für die Erzeugung der Regelbasis gespeichert. Nach dieser Analyse der Verkehrssituationen kann nun das ermittelte Verkehrsverhalten in der konsekutiven Abfolge der Verkehrssituationen als Petrinetz visualisiert werden, was mit dem Skript *Plot_SN.m* realisiert wird. Treten auf

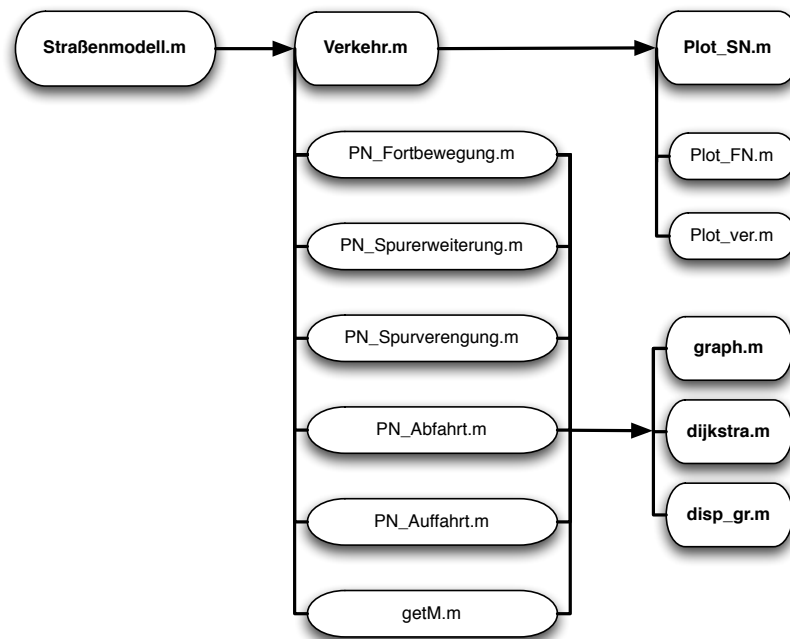


Abbildung 6.1: Programmstruktur der erstellten Skript-Dateien

Straßennetzebene Transitionen auf, die eine Änderung auf Formationsnetzebene induzieren, wird ein weiteres Fenster geöffnet, in dem das Formationsnetz und seine dortigen Interaktionen abgebildet werden. Ein Beispiel dieser Visualisierung zeigt Abbildung 6.2.

Die Visualisierung orientiert sich an den theoretischen Grundlagen, die in Kapitel 4 beschrieben sind, jedoch wird eine vereinfachte Implementierung vorgenommen. So werden die Attribute der Stellen auf Straßennetzebene mit den in Tabelle 6.1 aufgelisteten Symbolen versehen. Die Änderungen von Attributen des Formationsnetzes

Tabelle 6.1: Visualisierung von Attributen in Stellen des Straßennetzes

Stellenattribut	visuelle Kennzeichnung
unveränderte Topologie	dünne Umrandung
Fahrstreifenerweiterung	dünne, gestrichelte Umrandung
Fahrstreifenverengung	dünne, gepunktete Umrandung
Abfahrt	dicke Umrandung
Auffahrt	dicke, gestrichelte Umrandung

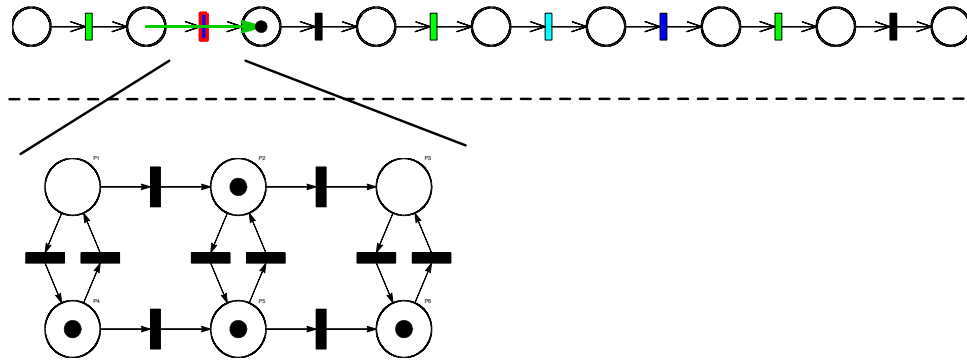


Abbildung 6.2: Exemplarische Visualisierung einer Verkehrssituation in Petrinetznotation auf Straßennetz- und Formationsnetzebene

werden auf Straßennetzebene durch unterschiedliche Visualisierung der Transitionen symbolisiert und sind in Tabelle 6.2 dargestellt. Neben den dort angegebenen

Tabelle 6.2: Visualisierung von Attributen in Transitionen des Straßennetzes und assoziierte Aktionen

Transitionsattribut	vis. Kennzeichnung	Aktion
reguläre Fahrt	schwarz	–
Rekonfiguration der Formation	blau	Aufruf <i>Plot_FN.m</i>
Änderung der Straßentopologie	cyan	Aufruf <i>Plot_ver.m</i>
Eintritt/Austritt einer Verkehrssituation	grün	Farbänderung des Meta-Token

farblichen Kennzeichnungen ist auch dargestellt, welche Subprogramme aufgerufen werden. Hierzu gehört zum einen der Aufruf von *Plot_FN.m* bei der Rekonfiguration der Formation, was bewirkt, dass sich ein weiteres Fenster öffnet, in welchem die Interaktionen auf Formationsnetzebene visualisiert werden. Zum anderen wird *Plot_ver.m* bei einer Topologieänderung des Formationsnetzes aufgerufen. Das hat zur Folge, dass Stellen hinzugefügt bzw. entfernt werden, und zwar auf der Formationsnetzebene des betreffenden Fahrstreifens. Die komplexe Meta-Token-Symbolik aus Tabelle 4.1 wurde in dieser Version der Implementierung noch nicht vollständig übernommen. Es findet lediglich bei einer Verkehrssituation, welche die Formationsnetzebene betrifft, eine Farbänderung des Meta-Tokens statt, um die Zustände des Formationsnetzes global zu beschreiben.

6.2 Werkzeug zur Simulation kooperativer Fahrzeugagenten

Neben dem Werkzeug, das die petrinetzbasierte Repräsentation des Verkehrs auf Autobahnen betrifft, wurde auch eine Simulationsumgebung in Simulink geschaffen, die es ermöglicht, die ermittelten Entscheidungsmechanismen und Konsens-Algorithmen zu testen. Die Struktur dieser Simulationsumgebung ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Die jeweils implementierten Fahrzeugmodelle des betrachteten Fahrzeugclusters sind dort als hellblaue Blöcke dargestellt. Sie senden ihre jeweiligen Positionsvariablen nach der Zusammenfassung zu einer Matrix an einen Block, der das Kommunikationsnetzwerk repräsentiert (ockerfarbig: *KommNetz*) sowie zu einem grün gekennzeichneten Block, der ein Skript zur Visualisierung des Fahrzeugclusters aufruft. Eine für diese Visualisierung exemplarische Formation eines Fahrzeugclusters ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Sie wird während einer Simulation in jedem Simulationsschritt aktualisiert und ermöglicht deshalb dem Entwickler eine Einschätzung der realisierten Kollektivdynamik. Im Block *KommNetz*, der eine *Embedded Matlab Function* ist, wird die in Abschnitt 4.5 eingeführte Filtermatrix berechnet. Der Block stellt daher den ersten Teil des Modells eines Kommunikationsnetzwerks dar. Die lokalen Informationsvariablen werden zu einem gemeinsamen, alle auftretenden fahrzeugseitigen Variablen umfassenden Vektor zusammengefasst und jedem Fahrzeugagentenmodell zugeführt.

Die interne Informationsverarbeitung eines Fahrzeugagenten ist im Simulink-Blockschaltbild (Abbildung 6.5) dargestellt. Zunächst werden mittels des Blocks *Empfangsmodul* die tatsächlich erhaltenen Informationsvariablen durch Auswertung der Filtermatrix aus dem Informationsvektor aller Fahrzeuge extrahiert. Diese und die lokalen Informationsvariablen sowie die vorhandene Anzahl an Fahrstreifen wird dem Block *RegelbasisUndKonsens* zugeführt, der die internen Entscheidungsmechanismen und Konsens-Algorithmen beinhaltet. Die Sollposition mit den entsprechenden x - und y -Koordinaten wird dann mittels numerischer Integration der differenziellen Größen ermittelt, die von diesem Block bereitgestellt werden. Die dann resultierenden Größen in x - und y -Position werden dem externen Block des Kommunikationsnetzes zugeführt. Gleichzeitig werden dem Netzwerk die Entscheidungsvariablen für die Empfangsbestätigung und die Erlaubnis für einen Fahrstreifenwechsel von diesem Block bereitgestellt. Diese werden zur Verhinderung von algebraischen

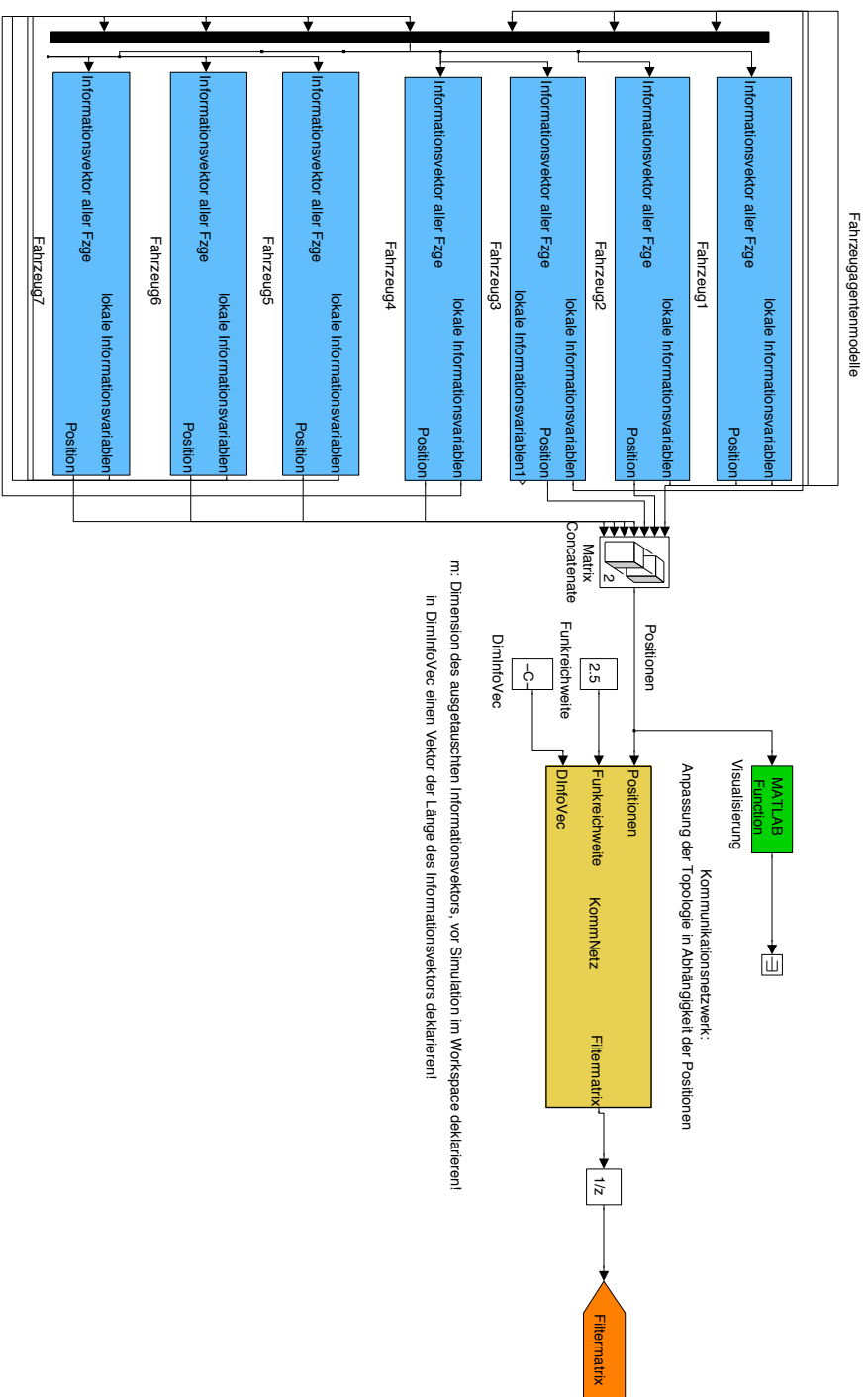


Abbildung 6.3: Simulink-Modell zur kooperativen Regelung eines Fahrzeugclusters

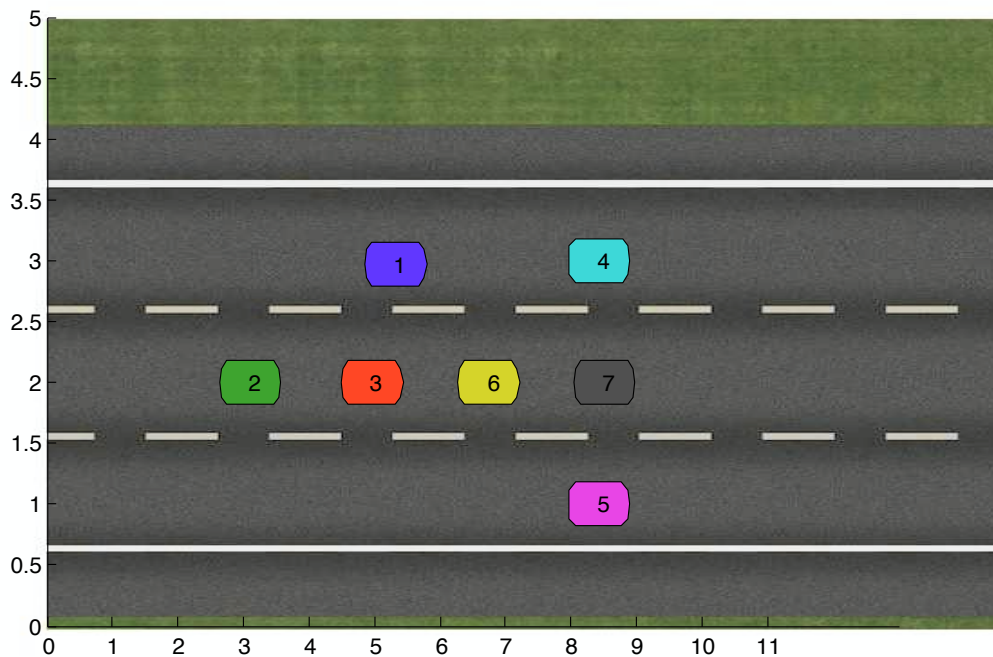


Abbildung 6.4: Visualisierung des Fahrzeugclusters

Schleifen um eine Zykluszeit verzögert ($1/z$ -Blöcke) und dem ersten Modellteil des Kommunikationsnetzwerks zugeführt.

6.3 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Simulationsergebnisse präsentiert, die sich aus der Implementierung des Konzepts ergeben. Zunächst wird die Simulation einer Fahrstreifenerweiterung in Abschnitt 6.3.1, danach eine Fahrstreifenverengung in Abschnitt 6.3.2 und abschließend der Einfluss von Kommunikationsrestriktionen anhand einer Simulation in Abschnitt 6.3.3 dargestellt. Die Darstellung der Distanzen und Fahrstreifen erfolgt hierbei in Pseudoeinheiten. Es ist wichtig zu berücksichtigen ist, dass die implementierte Dynamik der Positionsänderungen exakt den seitens der Algorithmen generierten Sollverläufen von Längsrelativ- und Querposition eines Fahrzeugagenten entspricht, da bislang kein unterlagert geregeltes Fahrzeugmodell mit in das Simulink-Modell integriert wurde.

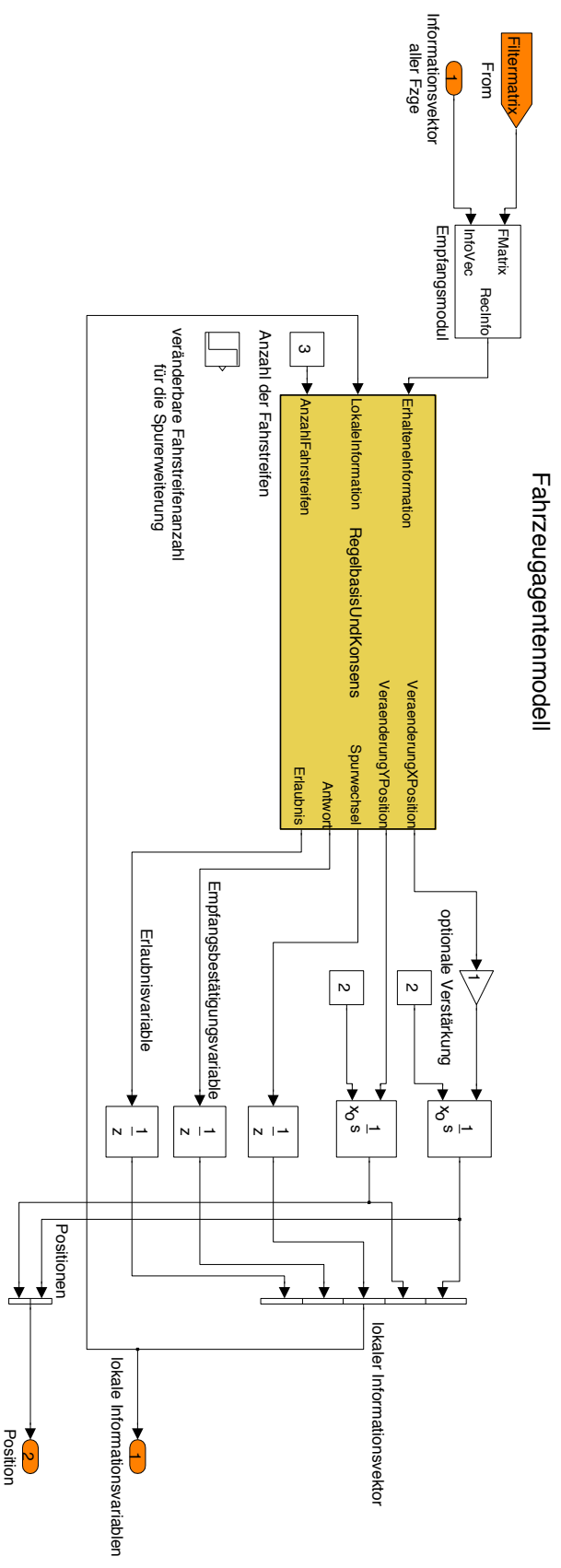


Abbildung 6.5: Unterlagertes Simulink-Modell eines Fahrzeugs mit integriertem Entscheidungs- und Konsens-Algorithmus

6.3.1 Simulation einer Fahrstreifenerweiterung

Eine exemplarische Simulation für eine Erweiterung um einen Fahrstreifen wurde durchgeführt und ist in den Abbildungen 6.6 und 6.7 präsentiert. Es wurde eine Anzahl von sieben Fahrzeugen simuliert, bei einem angenommenem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten, bei dem jeder Fahrzeugagent in der Lage ist, die gesendeten Informationsvariablen der anderen Fahrzeuge zu empfangen.

Man erkennt zunächst in der Abbildung 6.6 die Erzeugung einer Referenzformation durch Angleichung der x-Positionen von benachbarten Fahrzeugen. Gleichzeitig wird eine Formation höchster Dichte erzeugt, indem das vierte Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel vom ersten auf den dritten Fahrstreifen durchführt. Zum Zeitpunkt $t = 15$ s wird diskret die Fahrstreifenanzahl um eins erhöht. Das Kollektiv der Fahrzeuge reagiert darauf einerseits durch Bewegen des siebten Fahrzeugs auf den neuen, d. h. vierten Fahrstreifen. Diese Aktion verursacht gleichzeitig die Anpassung der Längspositionen des Kollektivs, die jedoch nach kurzzeitigen Transienten wieder zu einer Formation höchster Dichte konvergiert.

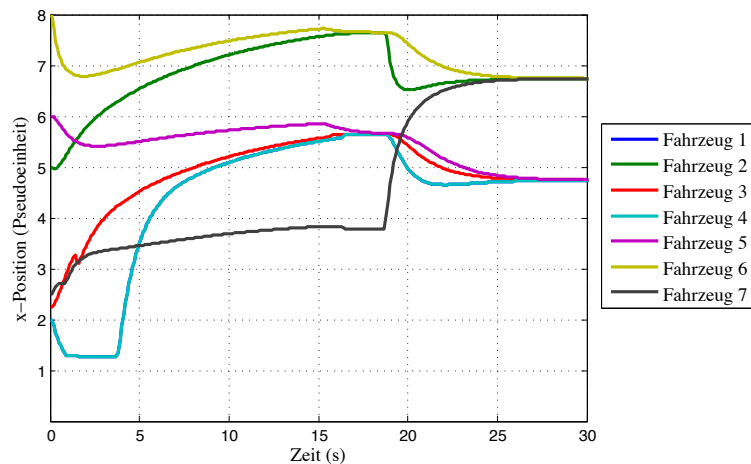


Abbildung 6.6: Exemplarischer Verlauf der relativen Längsposition bei einer Fahrstreifenerweiterung

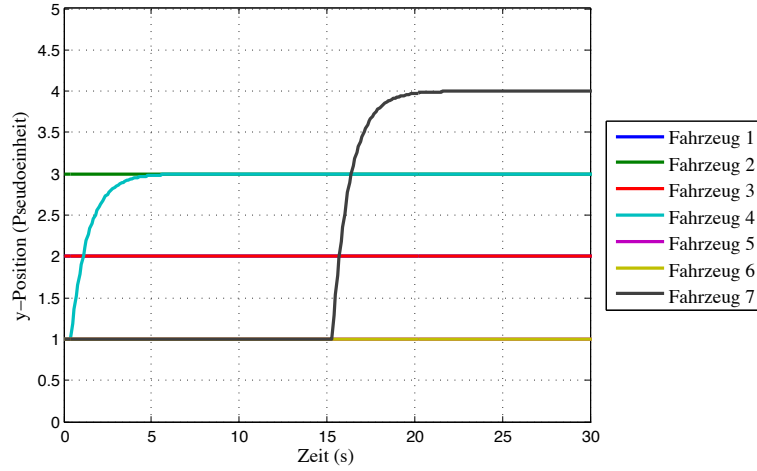


Abbildung 6.7: Exemplarischer Verlauf der Querposition bei einer Fahrstreifenerweiterung

6.3.2 Simulation einer Fahrstreifenverengung

Nach der im vorherigen Abschnitt dargestellten Simulation einer Fahrstreifenerweiterung wird anschließend eine Fahrstreifenverengung simuliert. Es soll in diesem Beispiel der erste Fahrstreifen wegfallen, sodass die Fahrstreifen zwei bis vier bestehen bleiben. Die Anzahl an Fahrzeugagenten und der Kommunikationsradius entsprechen dem ersten Beispiel. In der Abbildung 6.8 sind die zeitlichen Verläufe der relativen Längspositionen der Fahrzeuge dargestellt, dagegen in Abbildung 6.9 die entsprechenden zeitlichen Verläufe der Querpositionen.

Nach dem Einregeln auf eine Formation maximaler Dichte nach 30 Sekunden wird aufgrund einer Fahrstreifenverengung bei $t = 50\text{ s}$ die Formation rekonfiguriert. Hierzu ordnen sich die Fahrzeuge, welche sich zunächst noch auf dem ersten Fahrstreifen befinden, hinter dem letzten Fahrzeug der Fahrzeuge an, die sich auf den restlichen Fahrstreifen (hier zwei bis vier) befinden. Dies ist an der Anpassung der Längspositionen (rot und violett) von Fahrzeug 3 und Fahrzeug 5 in Abbildung 6.8, bzw. anhand der Darstellung der Formation in Abbildung B.5 ersichtlich. Befinden sie sich in der Solldistanz (zwei Pseudoeinheiten) hinter den restlichen Fahrzeugen, vollziehen sie jeweils Fahrstreifenwechsel zu den verbleibenden Fahrstreifen. Hierbei bewegt sich Fahrzeug 3 zum Fahrstreifen vier, während Fahrzeug 5 zum Fahrstreifen 2 wechselt. Dies ist an dem roten bzw. violetten Verlauf der Querpositionen in Abbildung 6.9 zu erkennen.

Der Ablauf der Formationsänderung, der in den Abbildungen 6.8 und 6.9 dargestellt ist, findet sich in Form von Momentaufnahmen der Formation in den Abbildungen B.1 bis B.7 des Anhangs B. In sieben Momentaufnahmen werden dort die Rekonfigurationen der Formation und die Konvergenz zur Formation maximaler Dichte bei der Reduktion um den ersten Fahrstreifen ($y=1$) gezeigt.

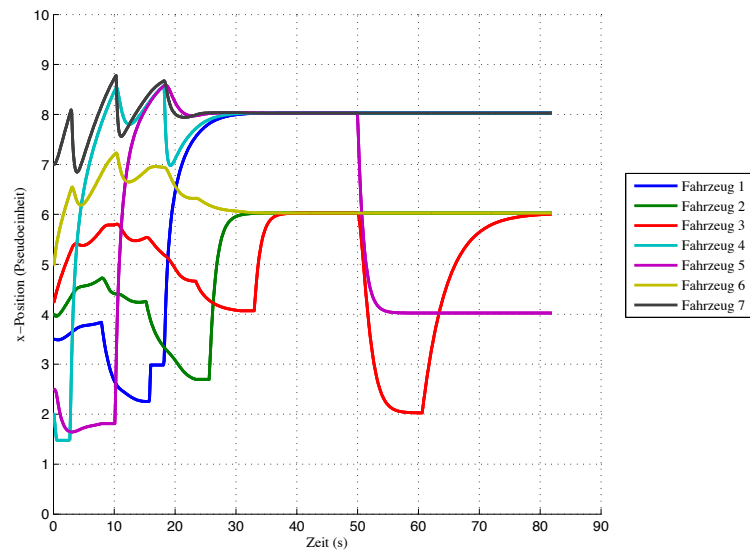


Abbildung 6.8: Exemplarischer Verlauf der relativen Längsposition bei einer Fahrstreifenverengung ($y=1$) von vier auf drei Fahrstreifen ($t=50$ s) nach einer vorherigen Fahrstreifenerweiterung ($t=15$ s)

6.3.3 Simulation einer Formationsbildung unter Kommunikationsrestriktionen

Um das Verhalten eines Clusters unter Kommunikationsrestriktionen zu untersuchen, wird hier exemplarisch das Bilden einer Formation maximaler Dichte bei einer Anzahl von sieben Fahrzeugagenten betrachtet, die ausgehend vom zweiten Fahrstreifen ($y=2$) auf insgesamt drei vorhandene Fahrstreifen verteilen. Diese Situation wurde für die Kommunikationsradien von 100, 4,5, 4 und 2,1 Pseudoeinheiten durchgeführt, um Effekte auf die Formationsbildung und die Formationsstabilität zu untersuchen. Die Soll-Längsdistanz zwischen zwei Fahrzeugen beträgt hierbei stets 2 Pseudoeinheiten.

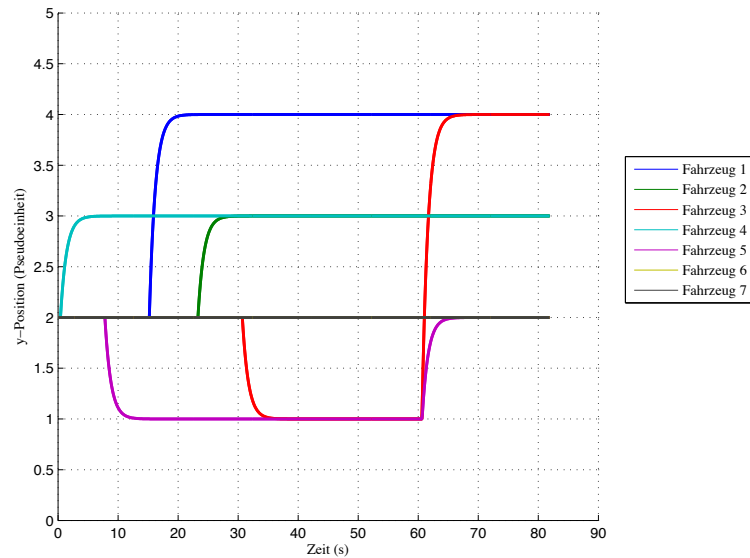


Abbildung 6.9: Exemplarischer Verlauf der Querpositionen bei einer Fahrstreifenverengung ($y=1$) von vier auf drei Fahrstreifen ($t=50s$) nach einer vorherigen Fahrstreifenerweiterung ($t=15s$)

Simulation mit einem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten

Den Verlauf der relativen Längspositionen sowie der Querpositionen in Abhängigkeit der Zeit zeigen die Abbildungen 6.10 und 6.11. Da in diesem Falle jedes Fahrzeug die Daten aller anderen Fahrzeuge empfangen kann, zeigt sich das gewünschte Verhalten der Fahrzeuge gemäß der implementierten Regelbasis. Sie verteilen sich auf die vorhandenen drei Fahrstreifen bei gleichzeitiger Anpassung der Längsrelativpositionen auf die implementierte Solldistanz von zwei Pseudoeinheiten.

Abbildung 6.12 zeigt zwecks Vergleich mit der Simulation unter Einschränkung des Kommunikationsradius auf 4 Pseudoeinheiten die Endformation höchster Dichte. Die einzelnen Rechtecke entsprechen symbolisch den Fahrzeugen, die mit der entsprechenden Nummerierung und den verwendeten Farben versehen sind. Die Abszissenachse entspricht der relativen Längsposition, wobei die Ordinatenachse der Querposition entspricht mit den diskreten Fahrstreifen bei $y = 1 \dots 5$.

Simulation mit einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten

Zur Veranschaulichung, inwiefern bei einer drastischen Reduktion des Kommunikationsradius ebenfalls noch eine Zielformation maximaler Dichte erreicht und das

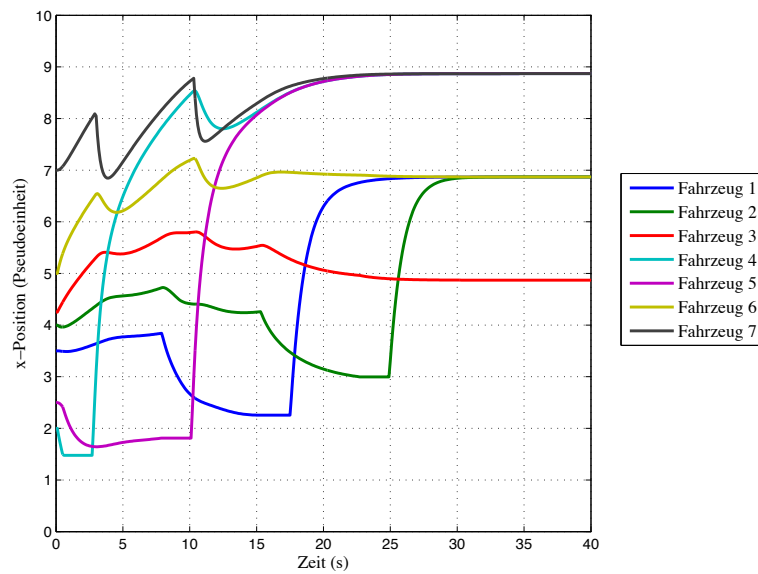


Abbildung 6.10: Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudeinheiten

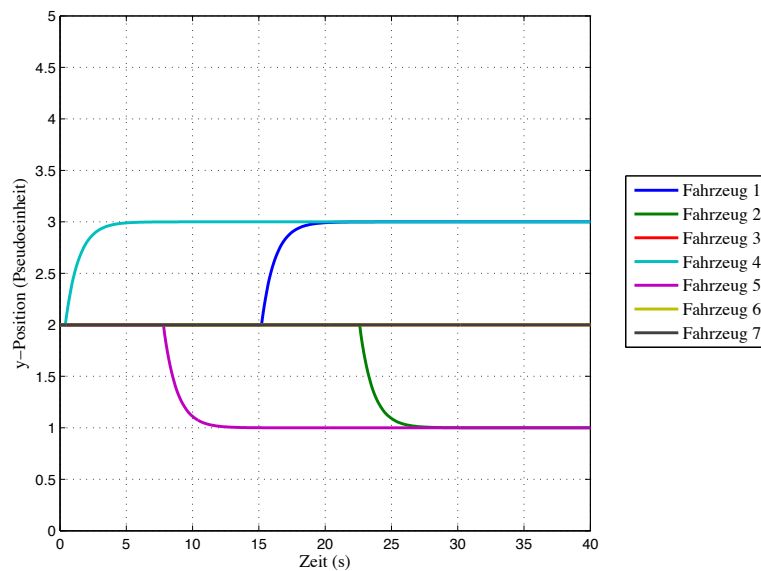


Abbildung 6.11: Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudeinheiten

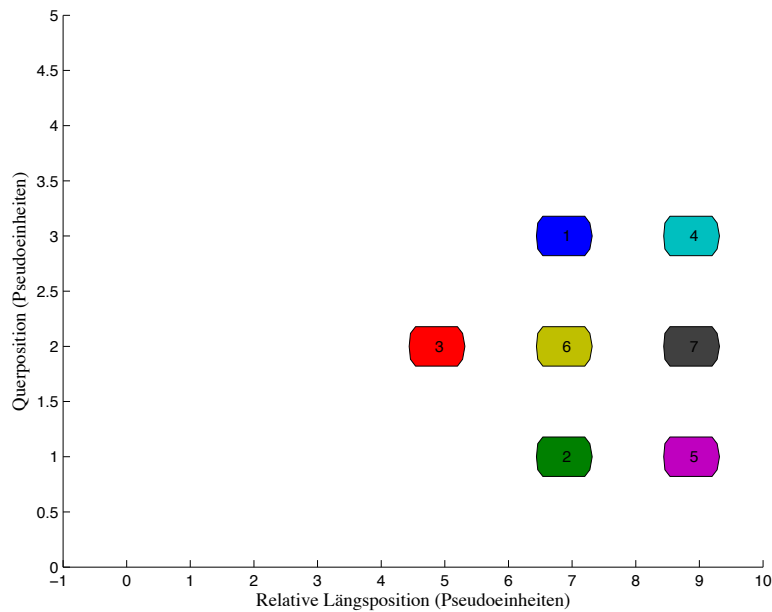


Abbildung 6.12: Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten

Kriterium der Formationsstabilität erfüllt wird, dienen die mittels Simulation erzeugten Abbildungen 6.13 und 6.14.

Abbildung 6.13 zeigt den Verlauf der relativen Längspositionen, während Abbildung 6.14 die Querpositionen in Abhängigkeit der Zeit darstellt. Der grundsätzliche Verlauf im Vergleich zu den relativen Längspositionen der Fahrzeuge aus Abbildung 6.10 bleibt gleich, jedoch werden die Interaktionen zur Einregelung der Solldistanz zum jeweils vorausfahrenden Fahrzeug hier von anderen Fahrzeugen übernommen. Das liegt daran, dass die Fahrstreifenwechsel auch von anderen Fahrzeugen, aber bezüglich der Fahrzeugnummer in derselben Reihenfolge ausgeführt werden, wie es durch den Vergleich von Abbildung 6.11 mit Abbildung 6.14 zu erkennen ist.

Aufgrund der Distanzen zwischen den Fahrzeugen empfangen einzelne Fahrzeuge nicht mehr die Informationsvariablen aller anderen Fahrzeuge, sodass sie die Entscheidungen für einen Fahrstreifenwechsel aufgrund einer reduzierten Informationsmenge treffen müssen. Diese Informationsmenge reicht hier jedoch aus, um eine stabile Endformation maximaler Dichte zu erzeugen. Dies zeigt sich zum einen an den konvergenten Verläufen der relativen Längspositionen und der Querpositionen in den Abbildungen 6.13 und 6.14, zum anderen an der in Abbildung 6.15 dargestellten Endformation. Diese entspricht hinsichtlich ihrer Geometrie derjenigen aus der

Simulation bei einem Kommunikationsradius von 100 Pseudoeinheiten (Abb. 6.12). Nur die erreichten Positionen der einzelnen Fahrzeuge unterscheiden sich im direkten Vergleich. Es zeigt sich, dass die Zielformation (hier eine Dichteformation) auch unter stark reduziertem Kommunikationsradius erreicht wird und dass die Formation stabil eingeregelt wird.

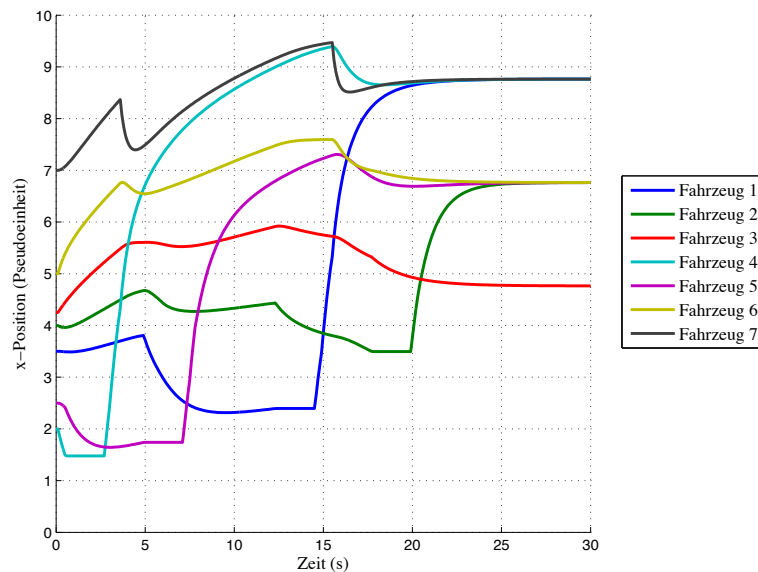


Abbildung 6.13: Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten

Simulation mit einem Kommunikationsradius von 4 Pseudoeinheiten

Im Folgenden soll die Formationserzeugung unter weiterer Reduktion der Kommunikationsreichweite simuliert werden, da sich die Frage stellt, inwiefern die Konvergenz zur Zielformation, die Stabilität der Endformation und die Sicherheit in Form von Kollisionsverhinderung dann noch gegeben ist. Bei weiterer Reduktion der Kommunikationsreichweite wird die für den einzelnen Fahrzeugagenten verfügbare Informationsmenge weiter eingeschränkt, sodass sich durch solche Untersuchungen in Zukunft die Frage beantworten ließe, welche Informationsmenge bzw. welcher Kommunikationsradius für eine generierte Regelbasis erforderlich ist, um die Konvergenz, Stabilität und Sicherheit zu gewährleisten. Dies kann auch beim Entwurf der Regelbasis dazu dienen, eine Auswahl von fahrzeugseitigen Umgebungsklassifikatoren vorzunehmen, vgl. Abschnitt 5.3 (zweiter Absatz).

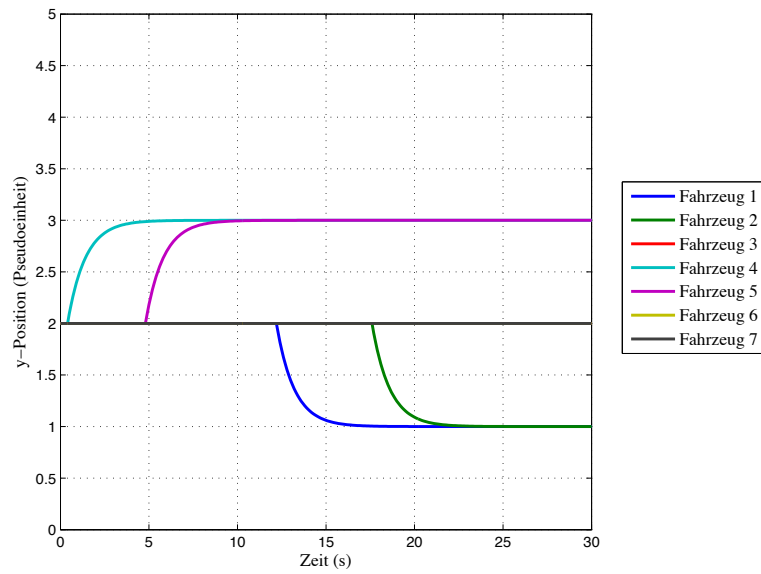


Abbildung 6.14: Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten

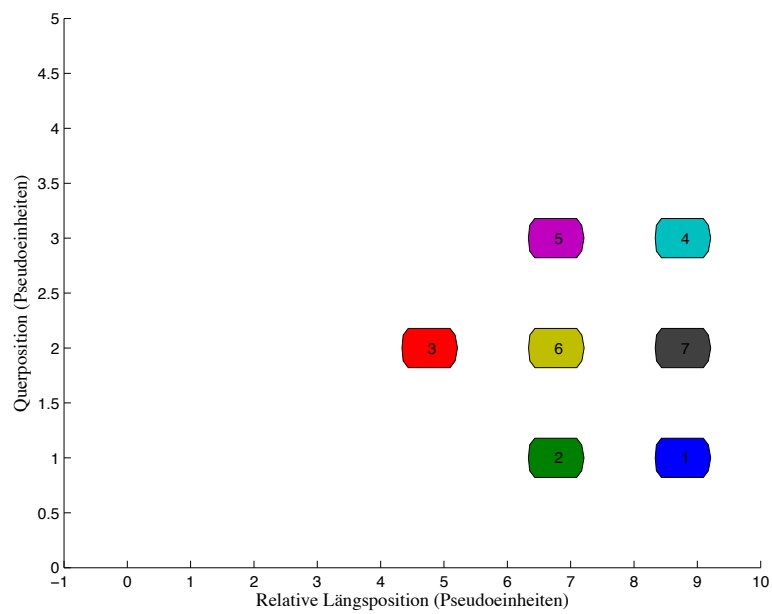


Abbildung 6.15: Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 4,5 Pseudoeinheiten

Die Abbildungen 6.16 und 6.17 zeigen die Verläufe der relativen Längspositionen, bzw. Querpositionen in Abhängigkeit der Zeit. Nach der Koordination zu einer Formation nach ca. 31 Sekunden verbleiben die relativen Längspositionen der Fahrzeuge konstant. Die Querpositionen der verbleibenden Fahrzeuge 2 bis 7 konvergieren ebenfalls, jedoch vollzieht Fahrzeug 1 (blau) einen Grenzyklus durch konsekutive Wechsel zwischen dem zweiten und dritten Fahrstreifen.

Dieses unerwünschte Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass durch den eingeschränkten Kommunikationsradius und die damit verfügbare, reduzierte Informationsmenge das Fahrzeug 1 nicht mehr in der Lage ist, sicher zu identifizieren, ob eine Formation maximaler Dichte erreicht ist. Stattdessen wird seitens des Fahrzeugs 1 der jeweils andere Fahrstreifen (2 bzw. 3) als Fahrstreifen identifiziert, der zur Erzielung maximaler Dichte „aufgefüllt“ werden müsste: Es identifiziert sich selbst als letztes Fahrzeug auf dem Fahrstreifen mit der maximalen Anzahl an Fahrzeugen und berechnet die Differenz der Fahrzeuganzahl zwischen diesem Ego-Fahrstreifen und dem Fahrstreifen mit der minimalen Anzahl an Fahrzeugen größer als oder gleich zwei berechnet. Letzteres ist der Fall, weil Fahrzeug 1 keine Daten über das rechtsseitig vorderste Fahrzeug des jeweils benachbarten Fahrstreifen empfängt. Aus diesem Grunde generiert Fahrzeug 1 die Entscheidung Fahrstreifenwechsel durchzuführen.

Auch wenn dieses Verhalten zwar unerwünscht ist, da das Kriterium der Formationsstabilität verletzt wird, ist dennoch die Sicherheit im Verkehr bezüglich dieses Clusters gegeben, da es nicht zu Kollisionen zwischen Fahrzeugen kommen kann. Dies ist der Fall, da die Kommunikationsreichweite ausreicht, um hinsichtlich der Längsdynamik einen Konsens zwischen den Fahrzeugen zu erzeugen und weil das Fahrzeug, das die Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel getroffen hat, vorher überprüft, ob der jeweils benachbarte Fahrstreifen frei ist. Für diese Überprüfung ist der hier vorliegende Kommunikationsradius auch noch ausreichend. Trotz der nicht vorhandenen Formationsstabilität findet jedoch eine Koordination zu einer erlaubten Zielformation (Formation maximaler Dichte) statt.

Simulation mit einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten

Nun soll untersucht werden, inwiefern die Sicherheit, die Konvergenz zur Zielformation und die Formationsstabilität beeinflusst wird, wenn die Kommunikationsreichweite noch weiter reduziert wird. Da die Längsrelativdistanz zwischen zwei Fahrzeugen auf 2 Pseudoeinheiten eingeregelt werden soll, erscheint es sinnvoll, zunächst für

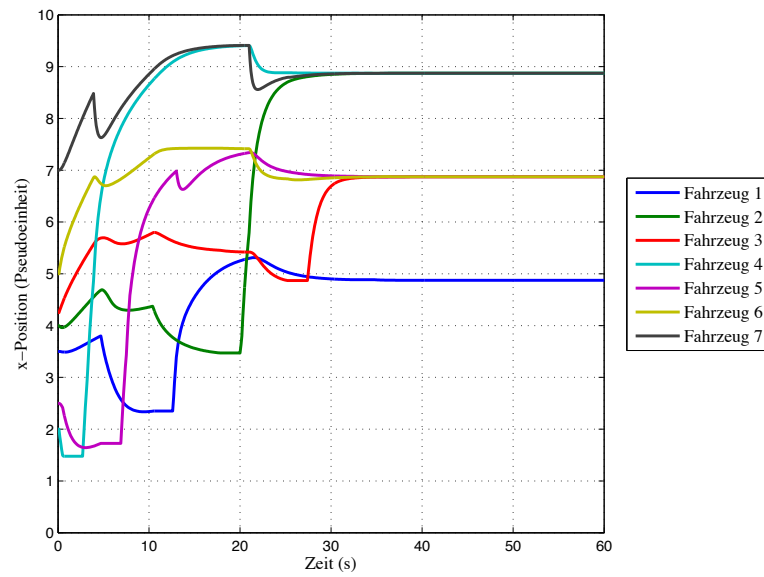


Abbildung 6.16: Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 4 Pseudoeinheiten

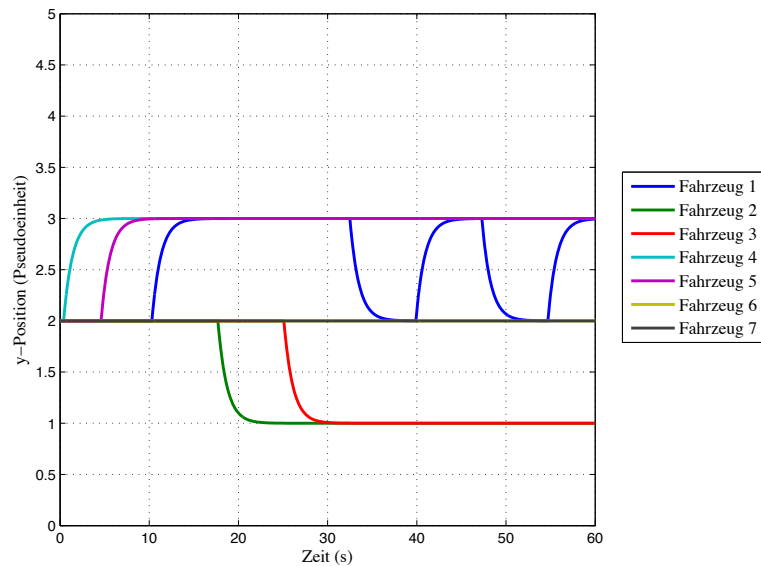


Abbildung 6.17: Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 4 Pseudoeinheiten

den Kommunikationsradius einen Betrag knapp über dieser Solldistanz – hier 2,1 Pseudoeinheiten – zu wählen um das sich anschließende Verhalten zu untersuchen. Hierdurch erscheint es möglich, dass die Fahrzeuge noch einen Konsens in Längsrichtung erzielen können. Die resultierende Dynamik ist in den Abbildungen 6.18 und 6.19 für relativen Längspositionen bzw. für die Querpositionen dargestellt. Doch sie verharren nach dem Wechseln auf den dritten bzw. vierten Fahrstreifen nahezu auf der Höhe von Fahrzeug 1.

Es zeigt sich an Abbildung 6.18, dass kein Konsens von allen Fahrzeugen bezüglich der Längsdistanz erreicht wird. Stattdessen erzielen die Fahrzeuge 2 bis 7 einen Konsens in der Längsdistanz über ca. 1,2 Pseudoeinheiten. Fahrzeug 3 ordnet sich in einer Distanz von 2 Pseudoeinheiten zu dieser Fahrzeuggruppe an. Die einzigen Fahrzeuge, die in dieser Simulation einen Fahrstreifenwechsel vollziehen sind die Fahrzeuge 4 und 5. Der Kommunikationsradius reicht nicht aus, dass diese das vorderste Fahrzeug (Nr. 7) des zweiten Fahrstreifens erkennen und mit ihm einen Konsens bzgl. der Längsdistanz zu null herbeiführen. Daher verharren sie in der Nähe der Längsposition von Fahrzeug 1, da sie aufgrund der reduzierten Informationsbasis Fahrzeug 1 als vorderstes Fahrzeug des zweiten Fahrstreifens identifizieren. Es konnte nicht abschließend geklärt werden, aus welchem Grunde die Längsrelativedistanz von 0,1 bis 0,2 Pseudoeinheiten zum Fahrzeug 1 nicht zu null ausgeregelt wird. Veränderungen von Simulationsparametern, wie relative Fehlertoleranz und Simulationszeit (Sample Time), deuten derzeit auf ein numerisches Problem hin, da hierdurch diese verbleibende Distanz variiert.

Nach den Interaktionen der Fahrzeuge ergibt sich die in Abbildung 6.20 dargestellte stationäre Endformation. Es zeigt sich, dass bei dieser Reduktion der Kommunikationsreichweite zwar eine stabile Endformation erreicht wird, jedoch kein Konsens über die Positionen seitens aller Fahrzeuge. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass die Sicherheit auch in diesem Falle gewährleistet ist, da keine Kollisionen auftreten.

Simulation mit einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten

Um zu untersuchen, welche Phänomene erzeugt werden, wenn der Kommunikationsradius unter die Solldistanz der Fahrzeuge herabgesetzt wird, werden im Folgenden die Simulationsergebnisse bei einer Reichweite von 1,5 Pseudoeinheiten dargestellt. Abbildung 6.21 zeigt die Verläufe der relativen Längspositionen, während Abbildung 6.22 die Querpositionen der Fahrzeuge darstellt.

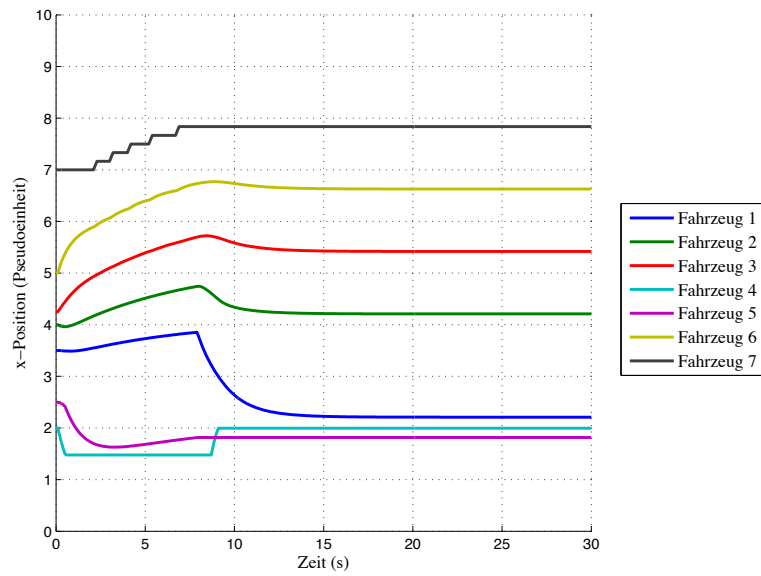


Abbildung 6.18: Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten

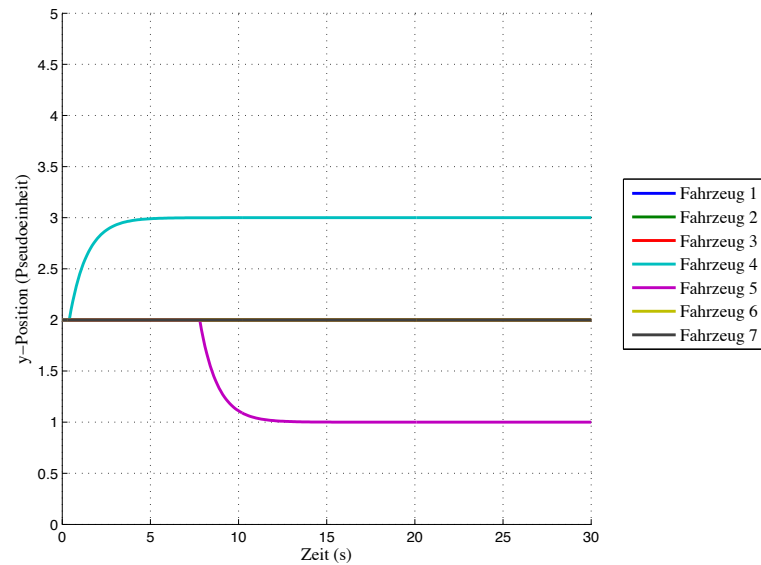


Abbildung 6.19: Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten

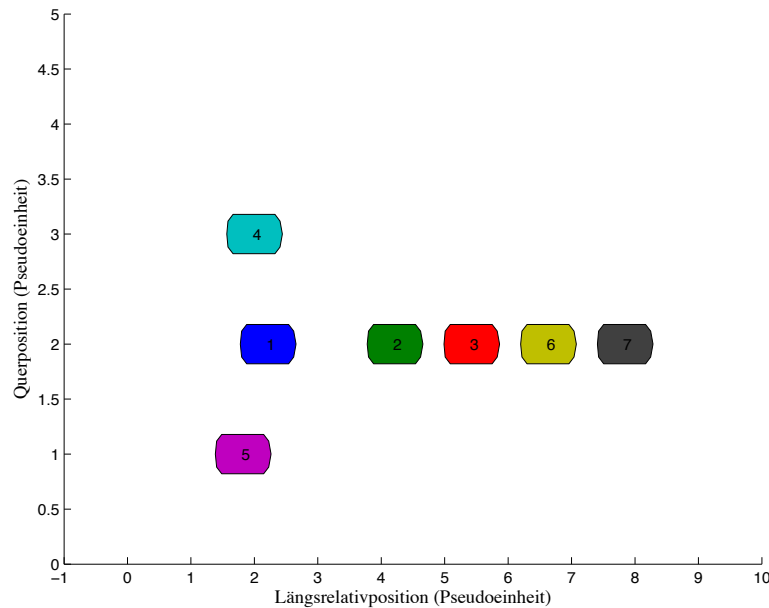


Abbildung 6.20: Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 2,1 Pseudoeinheiten

Die Simulation zeigt zunächst Anpassungen der Längsdistanzen zwischen den Fahrzeugen (Abbildung 6.21), anschließend vollzieht als erstes Fahrzeug 4 einen Wechsel auf den dritten Fahrstreifen (Abbildung 6.22). Dies liegt darin begründet, dass es zunächst letztes Fahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen ist und die restlichen Fahrstreifen nicht belegt sind. Gemäß der implementierten Regelbasis wird hiernach ein Fahrstreifenwechsel entschieden. Für den Fall, dass die benachbarten Fahrstreifen dieselbe Differenz an Fahrzeugen zum Ego-Fahrstreifen aufweisen, wird stets der in Fahrtrichtung linke Fahrstreifen als Zielfahrstreifen ausgewählt, so wie es hier auch von Fahrzeug 2 zu sehen ist. Währenddessen erfolgen seitens der restlichen Fahrzeuge weitere Anpassungen der Längsdistanz. Hierbei fällt im Vergleich zu den vorherigen Simulationen auf, dass zusätzliche Transiten, wie z. B. im Verlauf der Längsrelativposition von Fahrzeug 1 im Bereich $t = 1,2$ bis $3,1$ sec, auftreten. Offenbar liegt dies am wechselnden Ein- und Austreten des Fahrzeugs aus dem Kommunikationsbereich mit einem anderen Fahrzeug. Gleichzeitig passt Fahrzeug 5 seine Längsdistanz zu Fahrzeug 4 an, was es noch weiter aus dem kommunikativen Einzugsbereich von Fahrzeug 1 bringt. Fahrzeug 1 identifiziert sich damit fälschlicherweise als das letzte Fahrzeug auf seinem Fahrstreifen, erkennt aufgrund der begrenzten Reichweite auch Fahrzeug 4 auf dem benachbarten Fahrstreifen nicht, sodass es die Entscheidung

fällt, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen, der auch von den restlichen Fahrzeugen bestätigt wird, mit denen es in Kontakt ist. Durch das anschließende Fehlen von Fahrzeug 1 reduziert Fahrzeug 2 seine relative Längsposition, worauf es jedoch den Kontakt mit dem vorausfahrenden Fahrzeug 3 verliert. Dadurch bilden Fahrzeug 2 und 3 eine Gruppe, die keinen Kontakt mehr zur Gruppe der Fahrzeuge 3, 6 und 7 haben. Hierdurch fällt Fahrzeug 3 anschließend auch die Entscheidung einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Wie die Fahrstreifenwechsel vorher, erfolgt auch dieser auf den in Fahrtrichtung linken, d. h. dritten Fahrstreifen, da beide benachbarten Fahrstreifen aus Sicht des Fahrzeugs äquivalent nicht belegt sind. Fahrzeug 6 generiert nun den Anreiz aufgrund fehlender Kommunikation mit Fahrzeug 7, die Längsposition mit Fahrzeug 3 anzugleichen.

Untersucht man die resultierenden Fahrzeugpositionen im stationären Endzustand, dann zeigt sich, dass durch die Interaktionen unter dem stark eingeschränkten Kommunikationsradius der Cluster in vier Gruppen von Fahrzeugen getrennt wurde, die nicht weiter in der Lage sind, untereinander zu kommunizieren: Fahrzeuge 4 und 5; Fahrzeuge 1 und 2; Fahrzeuge 3 und 6; Fahrzeug 7. Die resultierende stationäre Endformation ist in Abbildung 6.23 angegeben.

Es zeigt sich anhand dieser Simulation, dass unter einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten zwar Formationsstabilität erzeugt wird, jedoch der Cluster durch die Interaktionen der Fahrzeuge separiert wird. Die resultierende Formation entspricht nicht der gewünschten Zielformation maximaler Dichte. Gleichzeitig traten jedoch trotz der stark reduzierten Kommunikationsreichweite keine Kollisionen auf, sodass es sich immer noch um ein sicheres Verkehrsverhalten handelt. Die insbesondere in der Längsdynamik zusätzlich auftretenden Transienten widersprechen außerdem der Forderung sanfter Zustandsübergänge innerhalb eines Clusters aus Fahrzeugagenten. Somit ist ein Kommunikationsradius von mindestens 4,5 Pseudoeinheiten erforderlich, um neben einem sicheren Verhalten auch die Konvergenz zur Formation und Formationstabilität zu gewährleisten.

6.4 Fazit zur Implementierung und zu den Simulationsuntersuchungen

Einerseits wurde das Werkzeug zur Modellierung und Analyse von Verkehrssituationen mittels Petrinezten vorgestellt, zum anderen das Werkzeug, das der Implemen-

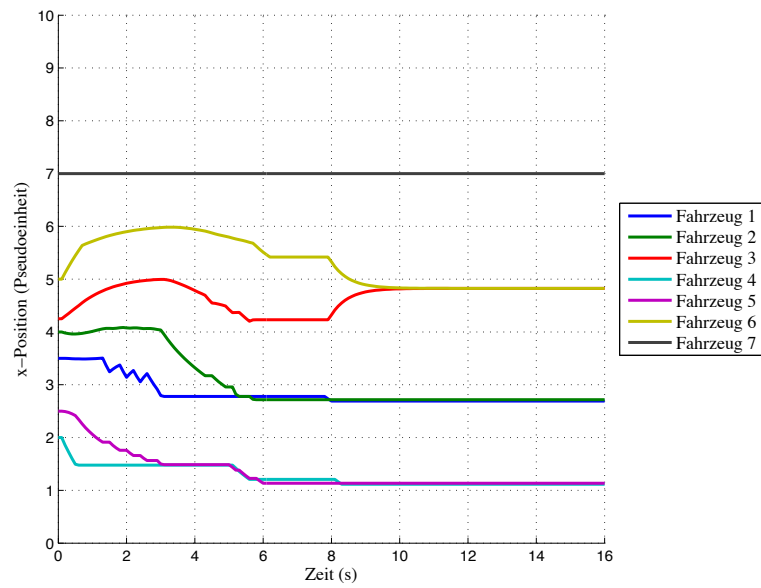


Abbildung 6.21: Verlauf der relativen Längspositionen bei einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten

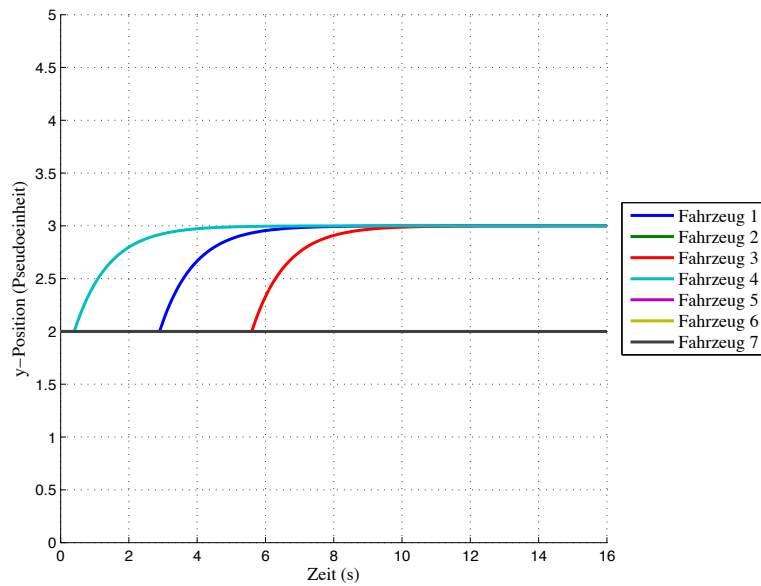


Abbildung 6.22: Verlauf der Querpositionen bei einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten

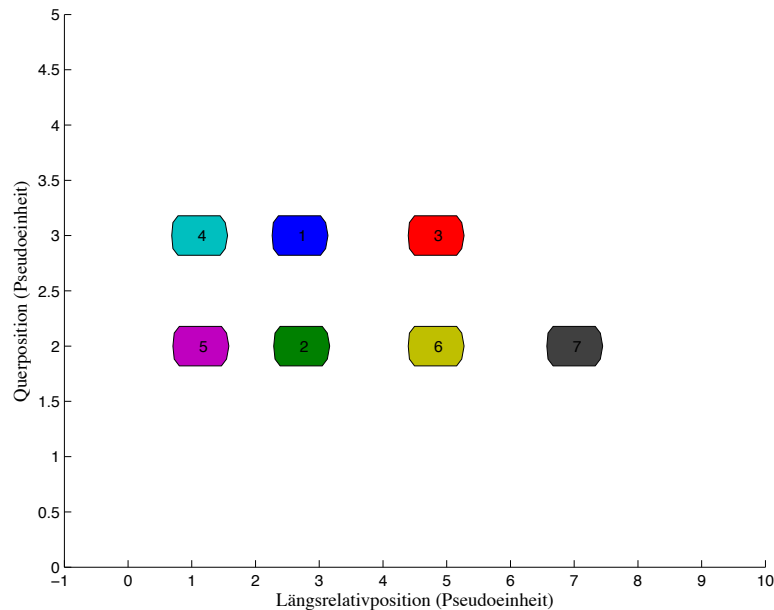


Abbildung 6.23: Stationäre Endformation höchster Dichte bei einem Kommunikationsradius von 1,5 Pseudoeinheiten

tierung der Regelbasis und einer fahrphysiknahen Simulation des Fahrzeug- bzw. Verkehrsverhaltens dient.

Das Petrinetz-Tool unterstützt den Entwurf der Regelbasis; es realisiert die Petrinetzbeschreibung aus Kapitel 4 sowie die Erreichbarkeitsanalyse und das Konzept zur Ermittlung der Regelbasis aus Kapitel 5. Die Petrinetzbeschreibung ist jedoch hinsichtlich der Meta-Token-Symbolik noch nicht vollständig implementiert. Die generierten Erreichbarkeitsgraphen der untersuchten Verkehrssituationen umfassen bis zu 68 Zustände, wobei die Rechenzeit bei maximal 30 Minuten auf einem Pentium 4 mit 1,7 GHz liegt. Es besteht hier also hinsichtlich der Implementierung der Petrinetzbeschreibung und der Verkürzung der Rechenzeit noch Optimierungspotential. Dennoch zeigte sich, dass das Konzept eines petrinetzbasierten Entwurfs einer Regelbasis gem. Abbildung 5.1 erfolgreich anzuwenden ist.

Die Regelbasis und die Konsens-Algorithmen konnten in einem Simulationswerkzeug unter Matlab/Simulink implementiert werden. Dieses besteht zum einen aus Fahrzeugmodellen, die sich aus einem Empfangsteil des Kommunikationsmodells, einem Regelungsanteil sowie einem Ausgangsanteil zur Sendung der fahrzeugseitigen Informationsvariablen zusammensetzen. Zum anderen wurde das Kommunikationsnetzwerk auf Basis von Graphen nach Abschnitt 4.5 implementiert. Die Dynamik der

Fahrzeugmodelle ist hier eine einfache Integratordynamik, welche die Sollpositionen der Fahrzeuge generiert. Eine komplexere Fahrzeugdynamik, wie z. B. ein Einspurmodell o.ä., wurde bislang nicht implementiert. Hierzu ist es nötig, das einzusetzende Fahrzeugdynamikmodell mit einer unterlagerten Längs- bzw. Querdynamikregelung zu versehen, die jeweils und in Kombination eine robuste Trajektorienverfolgung ermöglicht. Die im vorliegenden Modell generierten Sollpositionen würden dann die Eingangsgrößen der unterlagerten Regelungen darstellen.

Es wurden im vorherigen Abschnitt 6.3 mit der dargestellten Implementierung unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Diese zeigten zunächst, dass bei idealer Kommunikation und Ortung der Fahrzeuge aus einer Anfangsformation für eine konstante Fahrstreifenanzahl eine Formation maximaler Dichte erzielt wird. Gefolgt wurde diese Koordination von einer Fahrstreifenerweiterung, welche ebenfalls fahrzeugseitige Interaktionen zur Formationsbildung maximaler Dichte gemäß der implementierten Regelbasis hervorruft. Ergänzend wurde gezeigt, dass eine anschließende Fahrstreifenverengung fahrzeugseitige Interaktionen induziert, die zu einer Rekonfiguration der Formation auf der reduzierten Menge an Fahrstreifen führt, die ebenfalls der Bedingung bestmöglicher Raumausnutzung entspricht. Es lassen sich eine Abfahrt sowie eine Ausfahrt als entsprechende konsekutive Folgen einer Fahrstreifenerweiterung und einer Fahrstreifenverengung ausführen, weshalb diese hier nicht gesondert dargestellt wurden.

Hiernach wurde der Einfluss der schrittweisen Reduktion des Kommunikationsradius hinsichtlich der Aspekte Endformation, Formationsstabilität und Sicherheit untersucht. Durch der Reduktion des Kommunikationsradius sind einzelne Fahrzeuge nicht mehr in der Lage, Daten auszutauschen. Dies zeigt jedoch zunächst keinen Einfluss auf die resultierende Endformation sowie auf die Stabilität der Formation. Wird jedoch der Kommunikationsradius weiter herabgesetzt, können zum einen Instabilitäten auftreten, indem Fahrzeuge fortwährend Fahrstreifenwechsel durchführen. Bei weiterer Reduktion der Reichweite unter 2 Pseudoeinheiten wird die gewünschte Zielformation nicht mehr erreicht. Im Extremfall trennt sich der Cluster in einzelne Fahrzeuggruppen, die untereinander nicht mehr kommunizieren können.

Ursächlich für diese Phänomene ist jedoch auch das implementierte Kommunikationsmodell, das von einem fahrzeugseitigen Broadcast der Informationsvariablen ausgeht und keine Multi-Hop-Fähigkeit besitzt, die das Weiterreichen von Informationsvariablen seitens der Fahrzeuge bis zum Empfängerfahrzeug bezeichnet. Insbe-

sondere der beschriebene Effekt der Instabilität der Formation als Folge von fehlenden Informationen über die Fahrzeuganzahl auf den benachbarten Fahrstreifen würde durch Integration von Multi-Hop-Fähigkeit wegfallen. Jedoch ermöglicht das derzeitige Kommunikationsmodell hingegen das Design von Entscheidungsmechanismen, die allein auf direktem Informationsaustausch zwischen Teilnehmern basieren. Diese Art des Informationsaustauschs besteht auch bei aktiver oder passiver Sensorik, sodass es möglich erscheint, in Zukunft Fahrzeuge konzeptionell zu integrieren, die nicht über die Möglichkeit der Funkkommunikation verfügen.

Mit den Menschen ist es wie mit
den Autos.
Laster sind schwer zu bremsen.

Heinz Erhardt

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem die Beschreibungsmittel und Methoden für den Entwurf eines kooperativen Straßenverkehrs auf Autobahnen vorgestellt wurden, ist die Werkzeugunterstützung mit Matlab/Simulink anhand von exemplarischen Simulationen vorgestellt worden. Es folgt eine Zusammenfassung der vorgestellten Arbeit. Der Abschluss dieser Arbeit zeigt einen Ausblick für weiterführende Forschungsarbeiten und bewertet diese bezüglich der Umsetzungsfähigkeit.

7.1 Zusammenfassung

Der Straßenverkehr hat eine große Bedeutung, sowohl für den Individualverkehr als auch für den Güterverkehr. Durch das angestrebte und beständige kulturelle sowie wirtschaftliche Zusammenwachsen Europas und das Aufstreben der asiatischen Staaten kann davon ausgegangen werden, dass der Straßenverkehr auch in Zukunft einen hohen, wenn nicht gar zunehmenden Anteil an der Verkehrsleistung einnehmen wird. Für die Personenbeförderung liegen aus der Nutzerperspektive die Vorteile des Straßenverkehrs gegenüber dem Schienenverkehr auf der Hand. Man ist nicht an Zeitpläne gebunden und kann in einer vertrauten, individuell gestalteten und diskreten Atmosphäre reisen. Derzeitiger Nachteil gegenüber dem spurgebundenem Verkehr ist insbesondere, dass die Fahrerin bzw. der Fahrer gezwungen ist, die Reisezeit für die Steuerung und Überwachung des Fahrzeugs aufzuwenden. Auch derzeitige Fahrerassistenzsysteme, die Teile der Steuerungsaufgabe übernehmen (z. B. *Adaptive Cruise Control* (ACC)) oder die Fahrerin bzw. den Fahrer bei der Überwachung unterstützen, stellen keine wesentliche Entlastung dar. Denn die endgültige Ent-

scheidungsgewalt und Sicherheitsverantwortung liegen bei den derzeitig eingesetzten Assistenzsystemen stets bei der Person, die das Fahrzeug führt. Dagegen liegt beim spurgebundenen Verkehr die Sicherheitsverantwortung und Entscheidungsgewalt bei der Betreiberorganisation und dem Fahrzeugführer. Bei gegebenem Platz können die Fahrgäste während der Reisezeit fast beliebigen Beschäftigungen nachgehen oder die Reise genießen, sofern der Zeitplan eingehalten wird und die technischen Systeme nicht ausfallen. Bei Ausfällen oder Zeitverzögerungen haftet letztlich der Betreiber und die Fahrgäste haben einen gewissen Anspruch auf Schadensersatz. Diese Vorteile zeichnen den spurgebundenen Verkehr gegenüber dem motorisierten Individualverkehr aus. Ein weiterer Unterschied zwischen den Verkehrsmoden ergibt sich aus den Unfallzahlen, die z. B. hinsichtlich der Anzahl der Unfallopfer im Schienenverkehr wesentlich geringer ausfallen als im Straßenverkehr [147, Schaubild 1]. Dies ist insbesondere dem devianten Verhalten der Fahrerinnen bzw. Fahrer im Straßenverkehr anzulasten, was bei gegebenen Umgebungsbedingungen, sei es Witterung oder Verkehrsdichte, zu unangepasster Geschwindigkeit oder zu Fehlentscheidungen führt. Dagegen sorgt beim spurgebundenem Verkehr eine Leitstelle mit dem Blockbetrieb und den elektronischen Stellwerken für ein im Vergleich zum derzeitigen Straßenverkehr koordiniertes Verhalten zwischen Fahrzeugen, das Gefährdungssituationen vorbeugt und vermeidet.

Die grundsätzliche Idee dieser Arbeit liegt darin, die Vorteile beider Domänen – des spurgebundenen Verkehrs und des derzeitigen Straßenverkehrs – zu realisieren. Automobile sollen sich autonom im Straßenverkehr fortbewegen und mittels eines Funknetzwerks miteinander kommunizieren können. Über den Datenaustausch im Zusammenwirken mit fahrzeuglokalen Regelungen soll ein gewünschtes kooperatives Verhalten erzielt werden. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass systeminhärent Unfälle und Staus vermieden werden und die Straßenkapazität bestmöglich ausgenutzt wird. Im Gegensatz zu derzeitigen Projekten, die sich mit der Verkehrsbeeinflussung mittels Car2Car- und Car2Infrastructure-Kommunikation beschäftigen und den Informationsaustausch auch über Road-Side-Units (RSUs) und Leitzentralen realisieren, wurde hier ausschließlich die Kommunikation zwischen Fahrzeugen betrachtet, da RSUs zusätzliche Investitionen darstellen, die möglichst zu vermeiden sind. Außerdem lässt sich zeigen, dass für eine Verkehrslenkung mittels RSUs eine hohe RSU-Dichte erzielt werden müsste, um den Effekt der Unterabtastung zu vermeiden und somit das Verkehrsverhalten seitens der Leitstelle korrekt zu er-

fassen. Es erscheint daher sinnvoll, die Möglichkeiten der Car2Car Kommunikation bestmöglich auszunutzen. Daher wird das Kommunikationsnetzwerk zwischen den Fahrzeugen in dieser Arbeit nicht nur genutzt, um ergänzende Informationen, wie z.B. zu vorhandenen Staus oder Unfällen, zu übertragen, sondern es wird primär als Medium genutzt, um sicherheitsrelevante Daten zu übertragen, die von fahrzeugseitigen Regelungssystemen genutzt werden. Dies ist in bisherigen Projekten der Car2Car Kommunikation nicht der Fall.

Zum Zwecke dieser neuen Organisationsform des Straßenverkehrs wurde dieser als Multiagentensystem interpretiert und das Konzept eines Fahrzeugagenten eingeführt, der über Eigenschaften und Merkmale verfügt, die ein zukünftiges kooperatives und sicheres Verkehrsverhalten mittels Car2Car-Kommunikation und fahrzeugseitiger Perzeption realisieren sollen. Es wurde aufgezeigt, dass die unter Annahme idealer Funktionen von Kommunikation und Perzeption als wesentliche Fragestellung verbleibt, wie die Funktion der Handlungsanweisungen eines Fahrzeugagenten umzusetzen ist, einerseits hinsichtlich des Entwurfs ereignisdiskreter Entscheidungsmechanismen sowie andererseits hinsichtlich eines geeigneten kooperativen Regelungsverfahrens.

Diese Fragestellungen wurden im Stand der Forschung aufgegriffen. Dort konnte gezeigt werden, dass zwar diesbezüglich eine Vielzahl an mathematischen Beschreibungsmitteln existieren, diese jedoch einerseits nicht auf den Straßenverkehr angewendet wurden und andererseits nicht für den Straßenverkehr geeignet erscheinen. Für die formale Modellierung eines kooperativen Straßenverkehrs muss neben der kontinuierlichen Fahrzeugdynamik und den Eigenschaften des Kommunikationsnetzwerks auch ereignisdiskretes Verhalten abgebildet werden können. Außerdem muss es möglich sein, individuelle Intentionen der Fahrzeuge zu berücksichtigen und diese in Entscheidungsmechanismen zu integrieren. Anhand einer Klassifikation von Beschreibungsmitteln und deren Abgleich mit abgeleiteten Anforderungen auf Grundlage des Fahrzeugagentenkonzepts konnte gezeigt werden, dass ein integrierender Ansatz aus Petrinetzen und Kommunikationsgraphen als Beschreibungsmittel zur Modellierung geeignet ist. Die Ermittlung von Entscheidungsmechanismen, d. h. einer Regelbasis, beruht auf der Erreichbarkeitsanalyse von Petrinetzen, während als kooperatives Regelungsverfahren Konsens-Algorithmen eingesetzt werden, die auf Kommunikationsgraphen basieren.

Anschließend wurden unter Berücksichtigung dieser Anforderungen die gewähl-

ten Beschreibungsmittel formal eingeführt. Das Grundprinzip für die Entwicklung diskreter Entscheidungsmechanismen ist die Repräsentation der Fahrzeuge als Marken eines Petrinetzes, während die Stellen die Aufenthaltsräume und die Transitionen die Aktionsmöglichkeiten der Fahrzeuge darstellen. Zusätzlich wurden für die Abbildung von fahrzeugseitigen Intentionen und für die Berücksichtigung der Straßeninfrastruktur formale Erweiterungen vorgenommen. So wurde der Straßenverkehr als ein Objektsystem aufgefasst, bestehend aus einem Systemnetz, in welchem sich Objektnetze fortbewegen. Das Systemnetz stellt die Straßeninfrastruktur dar und wurde im Weiteren als Straßennetz bezeichnet, während die Objektnetze den Formationen von Fahrzeugen, sog. Formationsnetze, entsprechen. Um die unterschiedlichen Zustände der Formationsnetze auf Straßennetzebene kenntlich zu machen sowie um Intentionen von Fahrzeugen abzubilden, wurden auf Systemnetz- und Objektnetzebene Farbsätze eingeführt. Um die Eigenschaften des Straßennetzes und die Eigenschaften von Formationsnetzen, die in Stellen, Transitionen und den Farben von Marken codiert sind, wechselseitig abzubilden, wurde eine eigene, bidirektionale Interaktionsrelation zwischen Systemnetz- und Objektnetzebene formuliert. Mit diesem erweiterten Beschreibungsmittel der Petrinetze war es anschließend möglich, Basistypen von Verkehrssituationen zu modellieren, die später zu Analysezwecken genutzt werden konnten. Als Beschreibungsmittel der Kommunikation wurde ein regulärer graphenbasierter Ansatz gewählt, der für die spätere Implementierung in Form eines positionsabhängigen Informationsfilters formuliert wurde.

Nach der Einführung der Beschreibungsmittel wurde das Konzept zur Entwicklung der ereignisdiskreten Entscheidungsmechanismen eingeführt. Es basiert auf der automatisierten Erzeugung von Verkehrssituationen als Kombination eines Straßennetzes und eines Formationsnetzes und dessen Erreichbarkeitsanalyse. Innerhalb des jeweils ermittelten Erreichbarkeitsgraphen werden Zielformationen identifiziert und mittels des Dijkstra-Algorithmus die kürzesten Pfade berechnet. Anschließend werden die fahrzeugseitigen Aktionen pro Transition im Erreichbarkeitsgraphen in Abhängigkeit von Umgebungsklassifikatoren, wie dem Status der Nachbarstelle und der Anzahl von Fahrzeugen auf den Fahrstreifen, analysiert und deren Menge so reduziert, dass eine eindeutige Abbildung von Umgebungsklassifikatoren zu fahrzeugseitigen Aktionen existiert. Dies entspricht der ermittelten ereignisdiskreten Regelbasis, die genutzt wurde, um Fahrstreifenwechsel mit einem darauf basierenden Kommunikationsprotokoll zu koordinieren. Für die Stabilisierung der Formation und für die

Erzeugung der Zielformationen in Längsrichtung wurde ein Konsens-Algorithmus herangezogen, der ein koordiniertes Verhalten der Längsdynamik der Fahrzeuge realisiert. Dieser wurde so formuliert, dass stets eine eindeutige Kommunikationstopologie realisiert wird und dass nur bei direkt benachbarten Fahrzeugen die Notwendigkeit besteht Daten austauschen. Die so ermittelten Algorithmen stellen für die unterlagerten Fahrzeugregelungen Solltrajektorien in Längs- und Querrichtung zur Verfügung.

Nach dem Entwurf der Beschreibungsmittel und der Methoden wurde eine Werkzeugunterstützung entwickelt. So wurde in der Programmierungsumgebung Matlab ein Rahmenwerk geschaffen, das den Entwurf der diskreten Entscheidungsmechanismen unterstützt und das resultierende Verhalten im formulierten Petrinetzmodell nicht nur programmintern abbildet, sondern auch visualisiert. In Simulink wurde desweiteren ein Modell erstellt, in welchem die Realisierung der Entscheidungsmechanismen und der Konsens-Algorithmen unter Berücksichtigung der physikalischen Zusammenhänge getestet werden kann. Dieses Modell beinhaltet das Kommunikationsnetzwerk sowie die einzelnen Fahrzeugmodelle, die jeweils über die ermittelte Regelbasis verfügen.

Anhand der Simulationen einer Fahrsteifenerweiterung und einer Fahrstreifenverengung konnte gezeigt werden, dass die implementierte Regelbasis geeignet ist, ein koordiniertes sicheres Verkehrsverhalten zu erzeugen, das die Straßenkapazität bestmöglich ausnutzt. Für Untersuchungen unter Kommunikationsrestriktionen wurde die Kommunikationsreichweite zwischen den Fahrzeugen schrittweise eingeschränkt und überprüft, welche Auswirkungen dies auf die Formationserzeugung, -stabilität und die Sicherheit hat. Es konnte gezeigt werden, dass sich in jedem Fall ein sicheres Verhalten in Form von Kollisionsfreiheit einstellt. Dies liegt letztlich daran, dass in dem Modellierungsansatz der Formationsnetze Kollisionen a priori durch die Einschränkung der Stellenkapazität auf eins ausgeschlossen werden. Die eingeführte petrinetzbasierte Modellierung verfügt also über eine inhärente Kollisionsvermeidung, sodass sich in der abgeleiteten Regelbasis nur ein Verhalten erzeugen lässt, das inhärent sicher ist, obwohl die Realität eher mit keiner Begrenzung der Stellenkapazität abgebildet würde. Es wurde also die Petrinetzbeschreibung bereits unter der Zielsetzung eines sicheren Verkehrsverhaltens formuliert.

Durch die Einschränkung des Kommunikationsradius können jedoch einerseits Instabilitäten in Form von anhaltenden Fahrstreifenwechseln auftreten, andererseits

wird keine Endformation mehr erreicht, die einer gewünschten Zielformation entspricht. Im Extremfall kann es sein, dass sich aufgrund des eingeschränkten Kommunikationsradius Gruppen von Fahrzeugen ausbilden, die untereinander nicht mehr in der Lage sind, Daten auszutauschen. Im Endeffekt erscheint anhand der Simulationsuntersuchungen das Konzept – zum einen das Konzept des Fahrzeugagenten, zum anderen die eingeführte Modellierung und die Verfahren zur Generierung der Regelbasis und der kooperativen Regelung – als geeignet, einen zukünftigen automatisierten Straßenverkehr zu entwerfen.

7.2 Ausblick

Mit den vorgestellten Modellen und Methoden wurde die Möglichkeit aufgezeigt, automatisierten kooperativen Straßenverkehr unter Ausnutzung von Car2Car Kommunikation zu konzeptionieren, auszulegen und zu simulieren. Es verbleiben jedoch für weiterführende Forschungsarbeiten einige Problemstellungen rechentechnischer Art, konzeptioneller Natur sowie bezüglich der Umsetzbarkeit, die in konsekutiver Reihenfolge erläutert werden.

So ist die Generierung der Regelbasis über die Erreichbarkeitsanalyse mit einem hohen Rechenaufwand⁵ verbunden, was zum einen der hohen Dimension der Erreichbarkeitsgraphen und zum anderen der Vielfalt der zu untersuchenden Verkehrssituationen anzulasten ist. Gleichzeitig wird durch das modellbasierte Vorgehen für den Entwurf der Regelbasis jedoch sichergestellt, dass alle auftretenden Situationen berücksichtigt werden. Ein untersuchungswerter weiterer Ansatz für die Generierung der Regelbasis können Überdeckungsgraphen darstellen, deren Dimensionen wesentlich geringer als assoziierte Erreichbarkeitsgraphen ausfallen. Bei der Auswahl an kürzesten Pfaden in den Erreichbarkeitsgraphen zur Erzeugung einer eindeutigen Regelbasis ist es desweiteren sinnvoll, die beschriebenen Verfahren mit Methoden der Mustererkennung zu erweitern, um dort eine vollständig automatisierte Auswertung zu realisieren.

Die Regelbasis wurde mit einer zusätzlichen kontinuierlichen Dynamik ausgestat-

⁵Für die Ermittlung eines Erreichbarkeitsgraphen mit ca. 68 Zuständen lag die Rechenzeit bei ca. 30 Minuten auf einem Intel Pentium 4 PC 1,7 GHz . Zudem steigt generell die Dimension des Erreichbarkeitsgraphen exponentiell mit der Anzahl der Knoten des Petrinetzes. Durch die Möglichkeit (räumlich) begrenzte Verkehrssituationen einzeln zu analysieren, erscheint das Problem des Rechenaufwandes jedoch beherrschbar.

tet, sodass ein zeitabhängiger Sollverlauf der Querposition generiert wird. Bei der Längsdynamik wurde direkt der Verlauf der fahrzeugseitigen Längsgeschwindigkeit über der Zeit als Sollgröße herangezogen. Weiterführende Betrachtungen sollten die Wahl dieser Trajektorienverläufe in unterschiedlichen Verkehrssituationen im Zusammenspiel mit unterschiedlichen, unterlagerten Regelungsverfahren für die Längs- und Querdynamik untersuchen. Insbesondere die Fragestellung der resultierenden Kollektivdynamik bei gegebenen zu variierenden Fahrzeugmodellen mit den jeweils gewählten unterlagerten Regelungsverfahren und den Einflüssen des Kommunikationsnetzwerks bedarf weiterer analytischer Betrachtungen, die mit Simulationen des entsprechend zu erweiternden Rahmenwerks dieser Arbeit unterstützt werden können.

Auf konzeptioneller Seite ist noch die Interaktion zwischen Fahrzeugclustern weiterer Forschungsgegenstand sowie die Bildung von Clustern auf Strecken mit geringer Fahrzeugdichte und aus inhomogenen Fahrzeuggruppen. Erste Ansätze für die Erweiterung der Regelbasis für den Fall sich begegnender Cluster und als Folge koordinierten Überholens wurden in [70] und [75] seitens des Autors präsentiert.

Ein weiteres großes Forschungsgebiet ist die Erweiterung der hier vorgestellten Beschreibungsmittel und Methoden für ein koordiniertes Verkehrsverhalten im Stadtverkehr. Insbesondere die Anwendung der Car2Car Kommunikation und kooperativer Regelungen für Kreuzungsbereiche ist eine große wissenschaftliche Herausforderung unter der Zielsetzung, dass Lichtsignalanlagen nicht mehr unbedingt erforderlich sind. Untersuchungswert wäre auch für den Autobahnverkehr die konzeptionelle Integration von Car2Infrastructure Kommunikation, um die Reichweite der fahrzeugseitigen Kommunikationsnetze zu erweitern und zusätzliche Dienste bereitzustellen, welche im Gegensatz zu derzeit angedachten Konzepten die Möglichkeiten fahrzeuglokaler Regelungen mit ausnutzen. Denkbar wäre dies z. B. für die Kommunikation von globalen Verkehrsdaten zwischen Fahrzeugclustern über weite Entfernungen, um eine Adaption der Reglerparameter und Sollgrößen der nachfolgenden Fahrzeugcluster zu ermöglichen.

Neben dem Entwurf für einen zukünftigen Straßenverkehr können die entwickelten petrinetzbasierten Modellkonzepte genutzt werden, um das existente Verkehrsverhalten zu analysieren. Eine Anwendungsdomäne kann die Unfallforschung oder Gefährdungsanalyse sein, die durch Untersuchungen von Unfallstatistiken die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Interaktionen zwischen Fahrzeugen, wie z. B.

Fahrstreifenwechsel etc., in definierten Verkehrssituationen ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeiten können anschließend dafür genutzt werden, die in dieser Arbeit vorgenommene petrinetzbasierte Modellierung von Verkehrssituationen um Übergangsraten und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten zu erweitern, die Transitionen bzw. Stellen attribuieren. Das Ergebnis wäre ein farbiges, stochastisches Objektsystem für die Modellierung von Verkehrssituationen. Diese Modellierung kann im Weiteren dafür genutzt werden, um den Einfluss von integrierten Assistenzfunktionen auf das Verhalten von Fahrzeugen und Fahrzeugkollektiven über die resultierende Variation der Übergangsraten und Wahrscheinlichkeiten zu beurteilen. In diesem Zusammenhang wäre auch die sicherheitsgerichtete Entwicklung von zukünftigen Assistenzsystemen (sog. *Advanced Driver Assistance Systems*) zu betrachten, indem Modelle von Verkehrssituationen und dortige Fahrzeugformationen genutzt werden, um das resultierende Verhalten abzuschätzen und darauf basierend Spezifikationen von Sicherheitsfunktionen zur Entwicklung von Assistenzsystemen zu entwerfen. Eine Möglichkeit für die integrierte Beschreibung dieses Vorgehens mittels Petrinetzen ist die Verknüpfung des in dieser Arbeit entworfenen Modellkonzepts mit dem am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik formulierten sog. *Profund*-Ansatz [129].

Betrachtet man die vorliegende Arbeit und die beschriebenen technologischen Herausforderungen nun aus gesellschaftlicher Sicht, so mag die zukünftige Perspektive eines vollautomatischen Autobahnverkehrs wagemutig, wenn nicht gar utopisch anmuten. Dies liegt einerseits darin begründet, dass die Fahrerinnen und Fahrer einen Teil ihrer Freiheit aufgeben, wenn sie die Kontrolle des Fahrzeugs technischen Systemen überantworten und damit auf das Gefühl der *Freude am Fahren* teilweise verzichten. Andererseits stehen einer Umsetzung rechtliche Fragestellungen sowie Haftungsfragen derzeit im Wege. Die erste Fragestellung ist eher psychologischer Natur und kann auf die Dialektik von persönlicher Freiheitsausübung und kollektivem Nutzen zurückgeführt werden. Der kollektive Nutzen des automatischen Straßenverkehrs läge in definierten Reisezeiten, der Stau- und Unfallvermeidung. Ausdruck persönlicher Freiheitsausübung in diesem Kontext ist insbesondere die eigene Kontrolle über ein technisches System zu haben und damit Einfluss auf das Fahrgefühl besitzen zu können. Der Widerspruch kann nur gelöst werden, wenn der Nutzen der neuen Technologie des automatischen Verkehrs für die Fahrerin und den Fahrer die persönliche Einschränkung der Kontrolle über das Fahrzeug übersteigt. Teile des kol-

lektiven Nutzens können auch als ein persönlicher Nutzen aufgefasst werden, wie die Unfall- und Stauvermeidung sowie die im Mittel kürzeren Reisezeiten. Nur besteht die Gefahr, dass die persönliche Relevanz dieser Aspekte als zu gering eingeschätzt wird. Unfälle geschehen aus subjektiver Sicht eher selten und sind schließlich auch ohne Vollautomatisierung in den letzten Jahren rückläufig. Staus wie auch lange Reisezeiten mögen durch intelligente Routenplanung, die auf Statistiken und globalen Verkehrsdaten seitens Leitzentralen basieren, vermieden werden. Unter diesen Antithesen würde es vielleicht nicht möglich sein, ein Wohlwollen gegenüber der Automation im Straßenverkehr in der Gemeinschaft der Fahrerinnen und Fahrer hervorzurufen. Die einzige Möglichkeit, dies dennoch zu erzielen, läge in einem zusätzlichen Nutzen für Fahrerinnen und Fahrer, den der derzeitige Straßenverkehr so nicht bereitstellen kann. Und dies ist insbesondere die Möglichkeit, die Reisezeit aus Fahrersicht für sinnvollere Aktivitäten als die Steuerung und Überwachung des Fahrzeuges zu nutzen. Dies stellt zusätzliche aber Anforderungen an das Fahrzeug, denn es müsste je nach Wunsch des Nutzers z. B. über einen vollwertigen Arbeitsplatz verfügen oder gar über eine vollwertige Unterhaltungsausstattung. Wie auch in anderen Bereichen des Lebens würde hier ein qualitativ hochwertiger Zugang ins Internet eine zentrale Rolle einnehmen. Hinsichtlich der rechtlichen Aspekte werden derzeit bei der Einführung von neuen Fahrerassistenzfunktionen häufig die Bestimmungen des sog. Wiener Weltabkommens, Originaltitel *Vienna Convention on Road Traffic* [144], angemahnt, was auch in die Populärliteratur wie [142] Eingang fand. Es verpflichtet die Vertragsstaaten, ihre Verkehrsregelungen mit denen des Übereinkommens in Einklang zu bringen. Für die Diskussion um die Automation von Fahrzeugfunktionen werden häufig Art. 8 Abs. 5 mit

„Every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals.”

und desweiteren Art. 13 Abs. 1 mit

„Every driver of a vehicle shall in all circumstances have his vehicle under control so as to be able to exercise due and proper care and to be at all times in a position to perform all manoeuvres required of him.”

angeführt. Es stellt sich hiermit die Auslegungsfrage, ob Fahrerassistenzfunktionen, die weder vom Fahrer selbst ausgelöst werden noch übersteuerbar sind, für den

Straßenverkehr zulassungsfähig sind. Wenn jedoch der systematische Zusammenhang dieser Aussagen und der Vertragszweck untersucht werden, kommt man zu der Erkenntnis, dass das Wiener Weltabkommen der Zulassung solcher Assistenzsysteme nicht entgegensteht. Denn die obigen Aussagen des Vertragswerks sind eher als Pflichten für den Fahrzeugführer zu interpretieren und betreffen nicht die Zulassung von Fahrzeugen. Der Vertragszweck ist, im Interesse der Verkehrssicherheit in den Vertragsstaaten einheitliche Verkehrsregeln herbeizuführen [84]. Für die Einführung eines automatischen, kooperativ geregelten Straßenverkehrs ist jedoch absehbar, dass es zumindest für die europäischen Staaten ein ähnliches Abkommen geben müsste, das die Anforderungen an die genutzten Technologien und das Verkehrsverhalten und die genutzten Kommunikationsprotokolle spezifiziert. Auch die Haftungsfragen müssten in einem solchen Rahmen geklärt werden, da bei einem solchen System der Fahrzeugführer aus seiner Kontroll- und Eingriffspflicht entbunden wird. Prinzipiell würde daher die Sicherheitsverantwortung von der Fahrerin bzw. dem Fahrer zu den Produzenten der Kommunikations- und Regelungseinrichtungen verlagert, was vermutlich nicht mit den Interessen der Automobil- und Zuliefererindustrie vereinbar ist. Hier eröffnet sich ein Forschungsgebiet für alternative Haftungsregelungen. So wäre denkbar, die Haftung auf das Kollektiv der Nutzer und Produzenten zu verteilen, da alle Nutzer des technischen Systems „kooperativer Straßenverkehr“ dann dieselben Vorzüge und eventuellen Nachteile bei der Nutzung haben würden und das Sicherheitsrisiko auf alle Nutzer aufgrund identischen – im Sinne von nicht devianten – Fahrzeugverhaltens gleich verteilt ist. Diese rechtlichen Regelungen müssten in enger Zusammenarbeit mit der Konzeption zur Einführung des kooperativen Straßenverkehrs ausgearbeitet werden. Bei Letzterem stellt sich die Frage, wie ein Übergang der Technologien des derzeitigen Straßenverkehrs zum kooperativen Straßenverkehr gestaltet werden kann. Hierzu stellen sich folgende grundsätzliche Fragen: Sollen die Autobahnen um Fahrstreifen erweitert werden, die allein dem kooperativen Straßenverkehr dienen? Oder soll ein fließender Übergang geschaffen werden, indem in einer Übergangsphase auch manuell gesteuerte Fahrzeuge gemeinsam mit kooperativ geregelten Fahrzeugen am Verkehrsgeschehen teilnehmen? Eine andere Möglichkeit wäre, ab einem gewissen Baujahr die kooperativen Regelungs- und Kommunikationssysteme bei allen Kraftfahrzeugen einzuführen und nach einer Anzahl von Jahren bei einer gewissen Marktdurchdringung zentral koordiniert die fahrzeuglokalen Mechanismen für den kooperativen Straßenverkehr zu aktivieren. Ähnlich erfolgte in

Schweden die Umstellung von Links- auf Rechtsverkehr innerhalb von einer Nacht, was dort als sog. *Dagen H* bezeichnet wurde und in die Landesgeschichte einging. Die beschriebenen Fragestellungen können in weiteren interdisziplinären Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Automatisierung des Straßenverkehrs behandelt werden, um die Verkehrsqualität und Verkehrssicherheit zu verbessern.

Anhang A

Kommunikationsprotokoll zwischen Fahrzeugagenten

Die Querpositionen y der Fahrzeuge verändern sich nur während eines Fahrstreifenwechsels, wobei in dieser Arbeit aus Sicherheitsgründen angenommen wird, dass während der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels kein weiterer innerhalb des betreffenden Clusters gestartet werden kann. Für die Realisierung von Fahrstreifenwechseln werden die ermittelten Entscheidungsmechanismen aus der Regelbasis (Abschnitt 5.3) implementiert. Jedoch wird ein Fahrstreifenwechsel durch deren Überprüfung erst von einem Ego-Fahrzeug ausgeführt, nachdem eine Bestätigung aller anderen Fahrzeuge des Clusters erhalten wurde.

Es erfolgen hierbei pro Fahrzeug zwei Typen von Bestätigungen: eine Empfangsbestätigung a_i und eine Erlaubnisbestätigung p_i . Beides sind von dem Ego-Fahrzeug i erzeugte boolsche Variablen.

Die Zustimmung eines Fahrzeugs zur Durchführung eines Fahrstreifenwechsels wird als boolsche Variable p_i repräsentiert. Die Intention des Ego-Fahrzeugs, dessen Größen mit i indiziert werden, ebenfalls einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen, wird ebenfalls als boolsche Variable mit z_i bezeichnet. In Abhängigkeit der Position des Ego-Fahrzeugs zu einem mit j bezeichneten Fahrzeug, das einen Fahrstreifen-

wechsel intendiert, wird nun die ZustimmungsvARIABLE p_i wie folgt gesetzt:

$$p_i = \begin{cases} 1 & \text{falls } z_i = 0 \cap |y_i - y_j| \leq 1 \cup |x_i - x_j| > c \\ & \cup z_i = 0 \cap |y_i - y_j| > 1 \\ & \cup z_i = 1 \cap |y_i - y_j| = 1 \\ & \cup z_i = 1 \cap |y_i - y_j| \geq 3 \\ & \cup z_i = 1 \cap |y_i - y_j| = 2 \cap |x_i - x_j| > c \\ & \cup z_i = 1 \cap |y_i - y_j| = 2 \cap y_i > y_j \cap |x_i - x_j| > c \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Die Variable c bildet hierbei einen zusätzlichen Sicherheitsabstand in Längsrichtung. In den Simulationen wurde dieser als identisch zum Sollabstand angenommen. Die Fallunterscheidung bezüglich der Querpositionen berücksichtigt Konfliktsituationen, bei denen mit Rücksicht auf die ermittelte Regelbasis mehrere Fahrstreifen mit maximaler oder minimaler Anzahl an Fahrzeugen (über den Fahrstreifen) auftreten. Ein Fahrzeug j vollzieht dann erst einen Fahrstreifenwechsel, wenn die Regeln der Regelbasis erfüllt sind, sowie wenn von allen anderen Fahrzeugen des Clusters eine Zustimmung a_i sowie p_i erhalten wurde.

Anhang B

Visualisierung von konsekutiven Verkehrssituationen

Nachfolgend sind in chronologischer Abfolge Abbildungen zu den konsekutiven Situationen *Erzeugung einer Formation maximaler Dichte (Fortbewegung)*, *Fahrstreifenerweiterung* und *Fahrstreifenverengung* angegeben, wobei die Erzeugung der Formation maximaler Dichte von der Fahrstreifenerweiterung zeitlich überlagert wird (bei $t = 15$ Sekunden). Die Fahrstreifenerweiterung betrifft die Erweiterung von drei auf vier Fahrstreifen. Bei der daran anschließenden Fahrstreifenverengung, die bei einer Auffahrt vorliegen kann, wird der erste Fahrstreifen ($y=1$) eliminiert. Es werden in dem gesamten Ablauf insgesamt sieben Fahrzeugagenten simuliert. Die dargestellten Längspositionen sind in einem mit der Formation mitbewegten Koordinatensystem zu interpretieren.

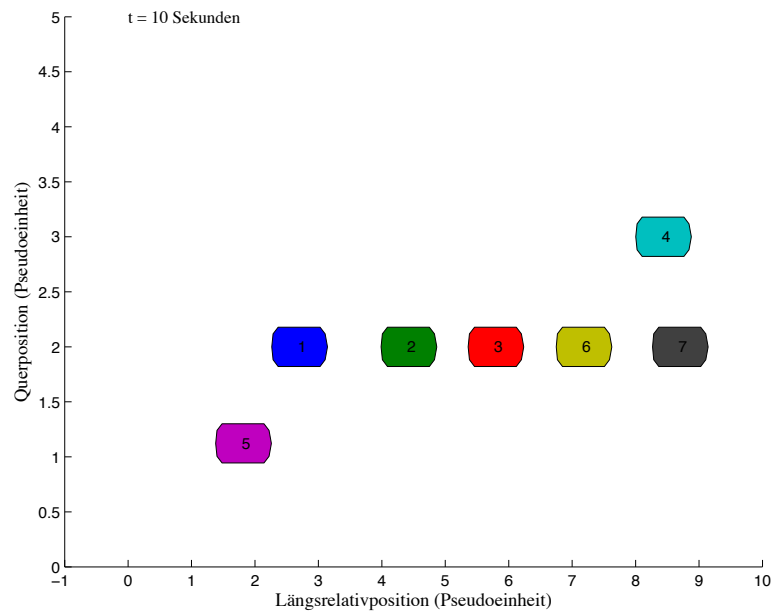


Abbildung B.1: Bildung einer Formation maximaler Dichte, alle Fahrzeuge starten auf Fahrstreifen $y=2$, Fahrzeuge 4 und 5 haben bereits Fahrstreifenwechsel durchgeführt.

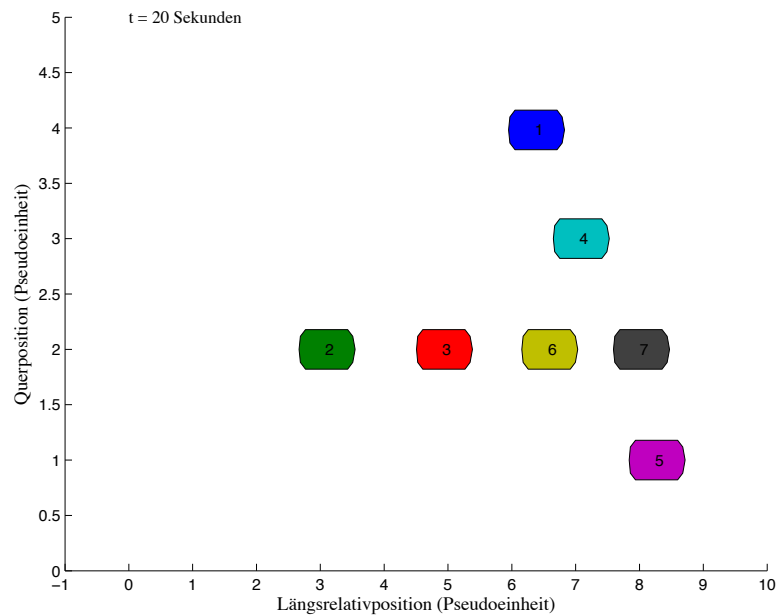


Abbildung B.2: Bildung einer Formation maximaler Dichte nach einer Fahrstreifen-erweiterung um $y=4$ bei $t = 15s$. Fahrzeug 1 wechselt auf den neu hinzugekommenen Fahrstreifen

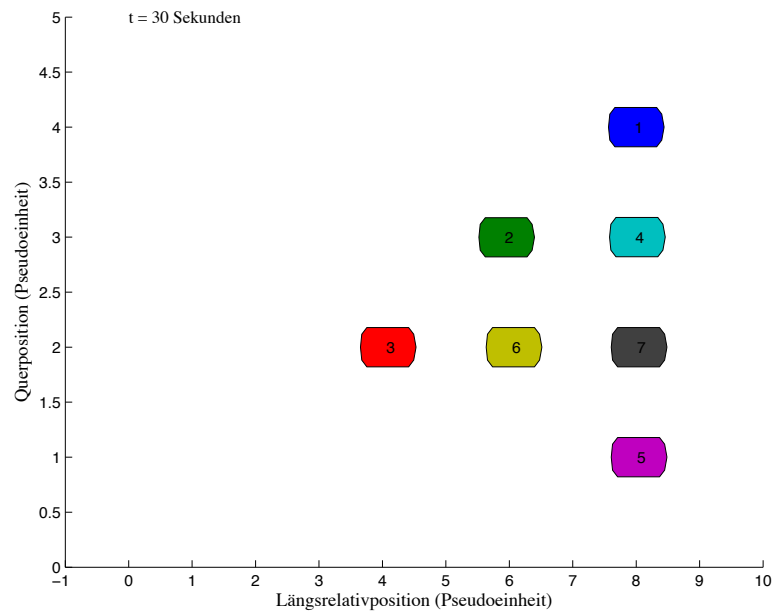


Abbildung B.3: Eine Formation maximaler Dichte ist hier noch nicht erreicht. Fahrzeug 3 wird sogleich einen Fahrstreifenwechsel auf den Fahrstreifen $y=1$ vollziehen, um die Formation maximaler Dichte zu erreichen.

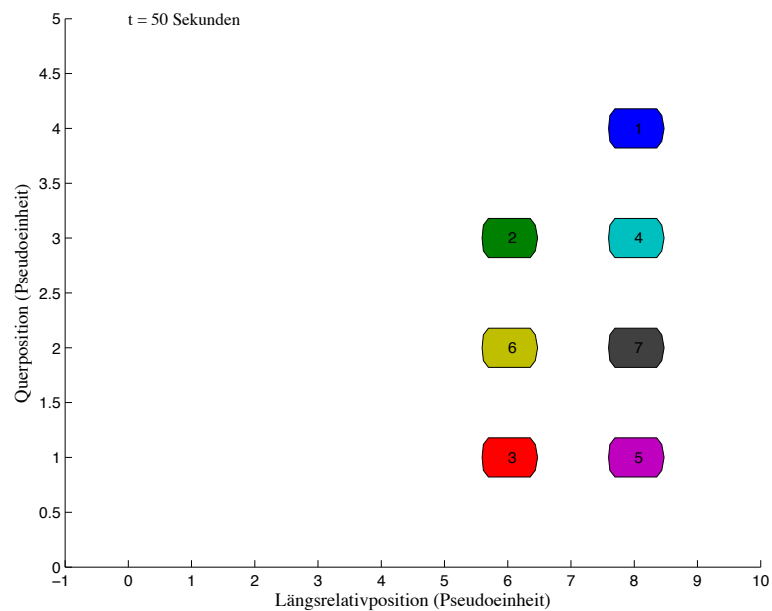


Abbildung B.4: Formation maximaler Dichte ist erreicht. Es kündigt sich nun eine Reduktion des ersten Fahrstreifens $y=1$ an. Fahrzeuge 3 und 5 werden sich hinter den Fahrzeugen der verbleibenden Fahrstreifen anordnen.

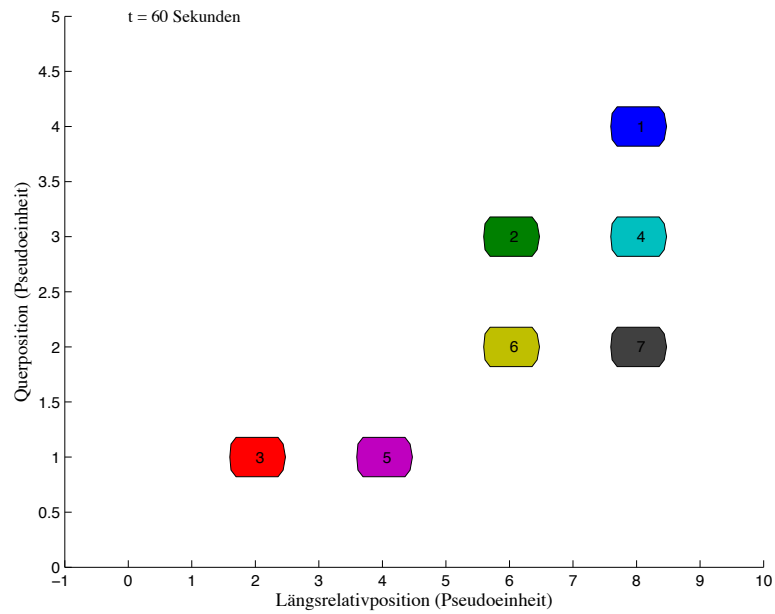


Abbildung B.5: Fahrzeuge 3 und 5 sind hinter den Fahrzeugen der verbleibenden Fahrstreifen angeordnet. Hiernach werden die Fahrstreifenwechsel vollziehen, um den wegfallenden Fahrstreifen $y=1$ zu räumen.

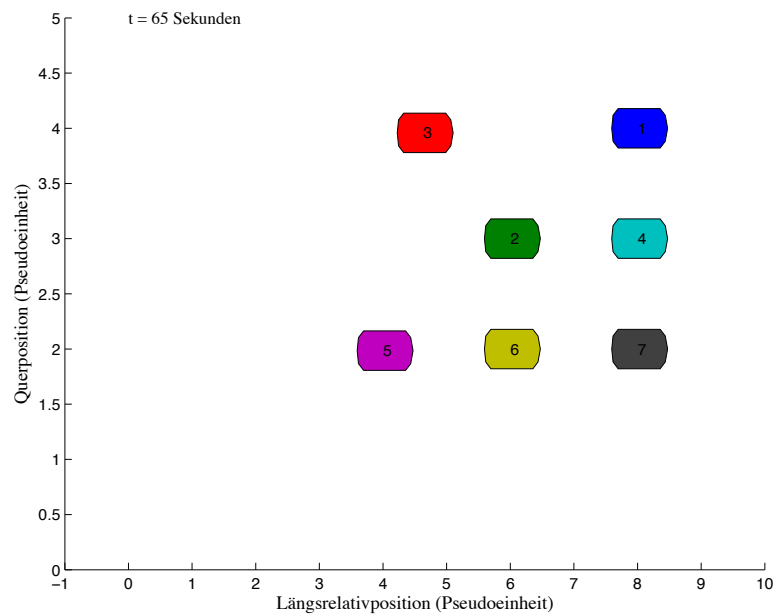


Abbildung B.6: Fahrzeug 3 wechselt auf den Fahrstreifen $y=4$, während Fahrzeug 5 auf den Fahrstreifen $y=2$ wechselt.

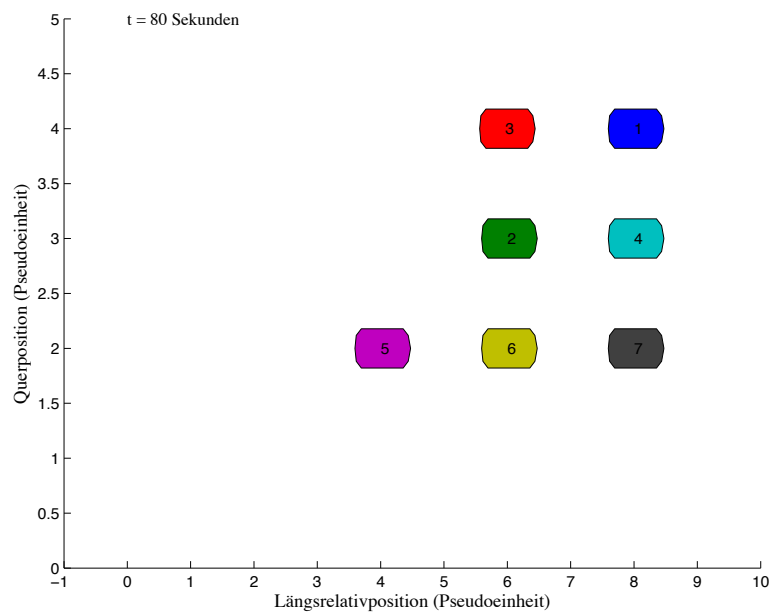


Abbildung B.7: Nach einem Aufholmanöver auf die Solldistanz zum vorausfahrenden Fahrzeug von Fahrzeug 3 ist die Formation maximaler Dichte bei Reduktion um den Fahrstreifen $y=1$ erreicht. Der stationäre Zustand der Formation ist erreicht.

Literaturverzeichnis

- [1] ABU FARHA, Anan ; SCHNIEDER, Eckehard: Modelling and Optimization of Traffic Safety and Operation in Urban Networks. In: *12th IFAC Symposium on Transportation Systems*, 2009
- [2] BAILLIEUL, John: The Geometry of Sensor Information Utilization in Non-linear Feedback Control of Vehicle Formations. In: KUMAR, Vijai (Hrsg.) ; LEONARD, Naomi (Hrsg.) ; MORSE, Stephen A. (Hrsg.): *Cooperative Control*. Springer, 2003
- [3] BAILLIEUL, John: Data-rate problems in Feedback Stabilization of Drift-free Nonlinear-Control-Systems. In: *16th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, 2004
- [4] BAILLIEUL, John: Data-rate requirements for nonlinear feedback control. In: *Symposium on Nonlinear Control Systems IFAC*, 2004
- [5] BAILLIEUL, John ; SURI, Anton: Information Pattern and Hedging Brockett's Theorem in Controlling Vehicle Formations. In: *42nd IEEE Conference on Decision and Control* IEEE, 2003, S. 556–563
- [6] BALAS, V.E. ; BALAS, M.M.: Driver Assisting by Inverse Time to Collision. In: *World Automation Congress, 2006. WAC '06*, 2006, S. 1 –6
- [7] BATZ, T. ; WATSON, K. ; BEYERER, J.: Recognition of dangerous situations within a cooperative group of vehicles. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Xi'an, China, 2009, S. 907–912
- [8] BAUMGARTEN, Bernd: *Petri-Netze – Grundlagen und Anwendungen*. Bd. 2. Spektrum Akademischer Verlag, 1996

- [9] BECKER, Uwe ; RODIC, Aleksander ; SCHNIEDER, Eckehard: Integrated Modeling of Driver-Assisted Control-Systems. In: *Symposium für Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel*, VDI, 2002, S. 108–129
- [10] BERGER, Christian ; RUMPE, Bernhard: Autonomes Fahren – Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge. In: *it - Information Technology* 50 (2008), 4, Nr. 4, S. 258 – 264
- [11] BRATZEL, Stefan ; TELLERMANN, Ralf: Mobilität und Verkehr. Version: 2003. http://www.bpb.de/publikationen/D1AKYM,1,0,Mobilit% E4t_und_Verkehr.html, Abruf: 27.11.2010. In: *Informationen zur politischen Bildung* Bd. 287. Bundeszentrale für politische Bildung, 2003
- [12] BRAUN, Imma ; KÖNIG, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard: A De-Centralized Organization Concept for Guided Traffic by Multi Agent Systems. In: *10th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services*. Madrid, 2003
- [13] BRAUN, Imma ; KÖNIG, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard: Agentensysteme für die Logistik im Schienenverkehr. In: *at - Automatisierungstechnik* 52 (2004), Nr. 7, S. 328–334
- [14] BUSCH, F. ; LÜSSMANN, J: Prozess- und Qualitätsmonitoring in Verkehrsinformationszentralen - Anforderungen, Konzept, Umsetzung im Projekt AKTIV-VM. In: *Fachtagung Verkehrsmanagement und Verkehrstechnologien*. Halle/Saale, 2008
- [15] CAVENEY, Derek: Cooperative Vehicular Safety Applications. In: *Control Systems Magazine* 30 (2010), August, Nr. 4, S. 38–53
- [16] CHÁVEZ GRUNEWALD, M. ; ABEL, D.: Control of a Group of Point Mass Vehicles Using Energy Methods. In: *European Control Conference EUCA*, IEEE, IFAC, 2009
- [17] CHOUIKHA, Mourad: *Entwurf diskret-kontinuierlicher Steuerungssysteme - Modellbildung, Analyse und Synthese mit hybriden Petrinetzen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1999

- [18] CHOUIKHA, Mourad ; OBER, Bernd ; SCHNIEDER, Eckehard: Model-Based Control Synthesis for Discrete Event Systems. In: *IASTED Conference on Modelling and Simulation*. Pittsburgh, 1998, S. 276–280
- [19] CHOUIKHA, Mourad ; WEGELE, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard: Modelling and analysis of continuous-discrete systems with hybrid petri nets. In: *IFAC - International World Congress*. Beijing, 1999, S. 509–514
- [20] DA SILVA, Viviane T. ; DE LUCENA, Carlos J. P.: From a Conceptual Framework for Agents and Objects to a Multi-Agent System Modeling Language. In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 9 (2004), 145–189. <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGNT.0000019691.42633.07>. – ISSN 1387–2532. – 10.1023/B:AGNT.0000019691.42633.07
- [21] DECKNATEL, G. ; ECKEHARD, Schnieder: A Formal Definition and Discrete-Event Simulation of Hybrid High-level Petri Nets. In: *IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics*. Dortmund, 2000, S. 6
- [22] DECKNATEL, G. ; SLOVAK, Roman ; SCHNIEDER, Eckehard: Definition of a Type of Continuous-Discrete High-Level Petri Nets and Its Application to the Performance Analysis of Train Protection Systems. In: ENGEL, S. (Hrsg.) ; FREHSE, G. (Hrsg.) ; SCHNIEDER, Eckehard (Hrsg.): *Modelling, Analysis and Design of Hybrid Systems*. Springer, 2002
- [23] DETERING, Stefan: *Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., Februar 2011
- [24] DETERING, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard: Requirements for precise simulation models for traffic flow optimizing ADAS. In: *12th IFAC Symposium on Transportation Systems*. Los Angeles, 2009
- [25] DETERING, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard: Two Level Approach for Validation of Microscopic Simulation Models. In: *SIMUL - International Conference on Advances in System Simulation*. Porto, Portugal, 2009
- [26] DETERING, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard ; SCHNIEDER, Lars: Data Acquisition Method for Simulative Analysis of Traffic Flow Optimizing ADAS. In:

WCTR - 12th World Conference on Transport Research. Lissabon, Portugal, 2010

- [27] DETERING, Stefan ; SCHNIEDER, Lars: Calibration and Validation of Simulation Models for Investigation of Traffic Assistance Systems. In: *FORMS/FORMAT*. Braunschweig, 2010
- [28] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: *Polizeilich erfasst Unfälle – Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr*. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportV%erkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/UnfaelleVerunglueckte.html?nn=50922>, Abruf: 10.04.2012
- [29] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: *Schienenverkehrsunfälle – Unfälle und Verunglückte im Eisenbahnverkehr nach Personengrupen*. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportV%erkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/Eisenbahnunfaelle.html?nn=50922>, Abruf: 10.04.2012
- [30] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: *Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre*. Electronisch - Tabelle 51000-0001. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=FF20502668B5C5E5C43B6B6F35348D1E.tomcat_G0_1_1?operation=abrufabelleAbrufen&selectionname=51000-0001&levelindex=1&levelid=1320487777646&index=6. Version: November 2010, Abruf: 05.11.2011
- [31] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: Unfallentwicklung auf Deutschen Straßen. 2011. – Forschungsbericht
- [32] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: *Unternehmen, Beförderte Personen, Personenkilometer (Personenverkehr mit Bussen u. Bahnen): Deutschland, Quartale, Verkehrsart*. Elektronisch - Tabelle 46100-0005. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;jsessionid=8FBC75118A4AFF7E97C2E5A42A43F7B5.tomcat_G0_1_1?operation=previous&levelindex=1&levelid=1320488472461&step=1. Version: November 2011, Abruf: 05.11.2011

- [33] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verkehrsleistung - Güterbeförderung*. <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/%Content/Statistiken/Verkehr/Gueterbefoerderung/Tabellen/Content75/Gueterbefoer%derung.psml>. Version: November 2011, Abruf: 10.04.2012
- [34] DEUTSCHES STATISTISCHES BUNDESAMT: *Entwicklung der Zahl der im Straßenverkehr Getöteten 1953 bis 2010*. <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Grafiken/Verkehr/Diagramme/Strassenverkehrstote,templateId=renderPrint.psml>. Version: 2011, Abruf: 04.11.2011
- [35] DIJKSTRA, Edsger W.: A Note on Two Problems in the Connexion with Graphs. In: *Numerische Mathematik 1* 1 (1959), S. 269–271
- [36] DOLD, J. ; STURSBURG, O.: A Communication-based Distributed Model Predictive Control Scheme with Time-varying Consistency Constraints. In: *European Control Conference EUCA, IFAC, IEEE*, 2009
- [37] DSRC TECHNICAL COMMITTEE: *Dedicated short range communications (DSRC) message set dictionary*. http://www.sae.org/technical/standards/J2735_200612. Version: Dezember 2006, Abruf: 01.12.2010
- [38] EIGEL, Thomas: *AutoUni Schriftenreihe*. Bd. 12: *Integrierte Längs- und Querverführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode-Regelung*. Logos Verlag Berlin, 2010
- [39] EIGEL, Thomas ; SCHNIEDER, Eckehard: Aktiv IQF: Integrierte Längs- und Querverführung durch strukturvariable Regelung. In: *AAET 2009 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig, 2009, S. 355–367
- [40] ENGELL, Sebastian (Hrsg.) ; FREHSE, Goran (Hrsg.) ; SCHNIEDER, Eckehard (Hrsg.): *Modelling, Analysis and Design of Hybrid Systems*. Springer Berlin / Heidelberg, 2002
- [41] FAX, J. A. ; MURRAY, R. M.: Information Flow and Cooperative Control of Vehicle Formation. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (2004), Nr. 9

- [42] FERBER, J. ; GUTKNECHT, O.: A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In: *Multi Agent Systems, 1998. Proceedings. International Conference on*, 1998, S. 128–135
- [43] FERBER, Jacques ; GUTKNECHT, Olivier ; MICHEL, Fabien: From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-agent Systems. In: *In: LNCS n. 2935: Procs. of AOSE'03*, Springer Verlag, 2003, S. 214–230
- [44] FIERRO, R. ; WESSELOWSKI, K.: Optimization-Based Control of Multi-Vehicle Systems. In: KUMAR, Vijai (Hrsg.) ; NAOMI, Leonard (Hrsg.) ; MORSE, Stephen A. (Hrsg.): *Cooperative Control*. Springer, 2005, S. 63–78
- [45] FRANZ, WALTER AND HARTENSTEIN, HENNING AND MAUVE, MARIO ; FRANZ, WALTER AND HARTENSTEIN, HENNING AND MAUVE, MARIO (Hrsg.): *Inter-Vehicle-Communications Based on Ad Hoc Networking Principles – The FleetNet Project*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2005
- [46] FRESE, C. ; BATZ, T. ; BEYERER, J.: Kooperative Bewegungsplanung zur Unfallvermeidung im Straßenverkehr mit der Methode der elastischen Bänder. In: DILLMANN, R. (Hrsg.) ; BEYERER, J. (Hrsg.) ; STILLER, J. (Hrsg.) ; ZÖLLNER, M. (Hrsg.) ; GINDELE, T. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 2009*, Springer, 2009
- [47] FRESE, C. ; BEYERER, J.: Bildung kooperativer Gruppen kognitiver Automobile. In: BERNS, K. (Hrsg.) ; LUKSCH, T. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 2007*, Springer, 2007
- [48] GAMRAD, D.: *Modeling, Simulation, and Realization of Cognitive Technical Systems*, Universität Duisburg Essen, Diss., 2011
- [49] GANZELMEIER, Lothar: *Nichtlineare H_∞ -Regelung der Fahrzeuglängsdynamik*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2005
- [50] GANZELMEIER, Lothar ; BECKER, Uwe ; SCHNIEDER, Eckehard: Nichtlineare Regelung der Fahrzeuglängsdynamik für zukünftige fahrzeugübergreifende Assistenzsysteme. In: *AUTOREG 2004 - Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren*. Wiesloch/Walldorf : VDI, 2004

- [51] GANZELMEIER, Lothar ; HELBIG, Jörg: Potentials of autonomous vehicle testing. In: *AAET 2005 - Assistance and Embedded Real Time Platforms for Transportation*. ITS-Niedersachsen, 2005
- [52] GAO, J. ; PETOVELLO, M. G. ; CANNON, M.: Development of precise GPS / INS / wheel speed sensor / yaw rate sensor integrated vehicular positioning system. In: *ION National Technical Meeting*. Monterey, CA, Januar 2006, S. 780–792
- [53] GASSER, Les: An overview of DAI. Version: 1992. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=186648.186658>. In: AVOURIS, Nicholas M. (Hrsg.) ; GASSER, Les (Hrsg.): *Distributed artificial intelligence*. Norwell, MA, USA : Kluwer Academic Publishers, 1992. – ISBN 0–7923–1585–5, 9 - 30
- [54] GAZI, V.: Swarm Aggregations Using Artificial Potentials and Sliding Mode Control. In: *IEEE Transactions on Robotics* 21 (2005), Nr. 6
- [55] GE, S. S. ; CHENG-HENG, F.: Queue and Artificial Potential Trenches for Multirobot Formations. In: *IEEE Transactions on Robotics* 21 (2005), Nr. 4
- [56] GEISTEFELDT, Justin: Anmerkungen zum Aussagegehalt des Fundamental-diagramms. In: *Internationales Verkehrswesen* (2011), S. 64–66
- [57] GLÄSER, Stefan: *Logische Analyse offener Kommunikationsarchitekturen für Kraftfahrzeuge*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2007
- [58] GLÄSER, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard ; HÖWING, F: Automatische Fehleranalyse einer offenen Kommunikationsarchitektur für Kraftfahrzeuge Teil 1 u. 2. In: *atp-Automatisierungstechnische Praxis* 9 u. 10 (2007)
- [59] GOEBEL, Rafal ; SANFELICE, G. Ricardo ; TEEL, R. Andrew: Hybrid Dynamical Systems. In: *IEEE Control Systems Magazine* 29 (2009), S. 28–93
- [60] GREENSHIELDS, B.D. ; J.R., Bibbins ; CHANNING, W.S. ; MILLER, H.H.: A Study of Traffic Capacity. In: *Highway Research Board Proceedings* Bd. 14, 1935, S. 448–477
- [61] HAAK, Ulrich ; SASSE, Andreas ; HECKER, Peter: On the Definition of Lane Accuracy for Vehicle Positioning Systems. In: *7th Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. Lecce, Italien : IFAC, 2010

- [62] HELBIG, Jörg: *Evaluierung robuster Regelungsstrategien am Beispiel eines automatisch spurgeführten PKW*. VDI, 2004
- [63] HELBING, Dirk: *Verkehrsdynamik - Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, 1997
- [64] HINSBERGER, A. ; WIEKER, H. ; RIEGELHUTH, G. ; ZURLINDEN, H.: Benefits and Technology of an Intelligent Road Side Unit System for Vehicle to Infrastructure- and Infrastructure to Centre Communication. In: *14th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2007
- [65] HÖRSTE, Martin Meyer z.: *Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2004
- [66] HOYER, R. ; C., Kühnel: Floating Car Observer - Perspektiven seiner Umsetzung. In: *HEUREKA 2008 - Optimierung in Verkehr und Transport*. Stuttgart, 2008
- [67] HU, Y.-C. ; LABERTEAUX, K.: Strong vanet security on a budget. In: *Workshop on Embedded Security for Cars (ESCAR)*. Berlin, November 2006, S. 1–9
- [68] HÜBNER, Matthias ; LÜCK, Tobias ; SCHNIEDER, Eckehard: Cooperative Control of Multi-Vehicle-Formations in Road Traffic by Means of Consensus Algorithm and Petri Nets. In: *12th IFAC Symposium on Transportation Systems*. Los Angeles, 2009
- [69] HÜBNER, Matthias ; LÜCK, Tobias ; SCHNIEDER, Eckehard: Enhanced Optimization of Traffic Flow and Traffic Safety by Means of Cooperative Control. In: *ITS Polish Congress*, 2009
- [70] HÜBNER, Matthias ; LÜCK, Tobias ; SCHNIEDER, Eckehard: Traffic Flow Organization by Means of Vehicle-Sided Rule-Bases. In: *IEEE 70th Vehicular Technology Conference*. Anchorage, 2009
- [71] HÜBNER, Matthias ; POLIAK, Jan ; BEISEL, Daniel ; BECKER, Uwe ; SCHNIEDER, Eckehard: Reference Measurement Platforms for Satellite Based Localisation in Ground Transportation. In: *IEEE 70th Vehicular Technology Conference*. Anchorage, September 2009

- [72] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Engineering of Car2Car Interactions by Means of Colored Petri Net Road Models. In: *WCTR - 12th World Conference on Transportation Research*. Lissabon, 2010
- [73] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Querstabilisierung von Gespannen mittels Sliding Control. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2010), 132-139
- [74] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Traffic flow optimization by means of vehicle flocking in Petrinet representation via Consensus-algorithm. In: *AVEC 10 - 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, 2010
- [75] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Traffic Organization by means of Vehicle-Sided-Rulebases – A cooperative Approach to Improved Traffic Quality and Traffic Safety. In: *IAV 2010 - 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. Lecce, Italien, 2010
- [76] HÜBNER, Matthias ; SCHNIEDER, Eckehard: Verkehrsorganisation mittels fahrzeugseitiger Regelbasen - ein kooperativer Ansatz zu verbesserter Verkehrsqualität. In: *AAET 2010 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme u. eingebettete Systeme für Transportmittel*, ITS-Niedersachsen, 2010
- [77] HÜBNER, Matthias ; STORK, Thomas ; BECKER, Uwe ; SCHNIEDER, Eckehard: Lateral Stabilization of Vehicle-Trailer Combinations against Crosswind Disturbances by means of Sliding Control. In: *16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*. Ajaccio, 2008
- [78] ICKERT, Lutz ; MATTHES, Ulrike ; ROMMERSKIRCHEN, Stefan ; WEYAND, Emely ; SCHLESINGER, Michael ; LIMBERS, Jan: Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050 / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2007. – Projekt-Nr. 26.0185/2006
- [79] IEEE: *Research and Innovative Technology Administration (RITA)*. <http://www.standards.its.dot.gov/factsheet.asp?f=80>. Version: Januar 2006, Abruf: 01.12.2010

- [80] JENNINGS, Nicholas R.: On agent-based software engineering. In: *Artificial Intelligence* 117 (2000), Nr. 2, 277 - 296. [http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0004-3702\(99\)00107-1](http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0004-3702(99)00107-1). – DOI DOI: 10.1016/S0004-3702(99)00107-1. – ISSN 0004-3702
- [81] JENSEN, Kurt: Coloured Petri nets. Version: 1987. <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0046842>. In: BRAUER, W. (Hrsg.) ; REISIG, W. (Hrsg.) ; ROZENBERG, G. (Hrsg.): *Petri Nets: Central Models and Their Properties* Bd. 254. Springer Berlin / Heidelberg, 1987, 248-299. – 10.1007/BFb0046842
- [82] KÄMPCHEN, Nikolaus ; SCHIELE, Bernd ; DIETMAYER, Kain: Situation Assessment of an Autonomous Emergency Brake for Arbitrary Vehicle-to-Vehicle Collision Scenarios. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10 (2009), Dezember, Nr. 4, S. 678-687
- [83] KAPLAN, Elliott D. ; HEGARTY, Christopher J.: *Understanding GPS: Principles and applications*. 2. ed. Boston, Mass. : Artech House, 2006 (Artech House mobile communications series). – ISBN 1580538940
- [84] KEMPEN, Bernhard: Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen. In: *SVT 2008 – 3. Sachverständigentag*. Berlin, Februar 2008
- [85] KERNER, Boris S.: *The Physics of Traffic*. Springer Berlin / Heidelberg, 2004
- [86] KIEFER, J.: *Methodische Partitionierung und Parametrierung von Feldbussen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1996
- [87] KIEFER, J. ; SCHNIEDER, Eckehard: Petri net modelling of field bus systems. In: *16th International Conference on Application and Theory of Petri Nets - Petri Nets applied to Protocols*. Torino, 1995, S. 97-109
- [88] KÖNIG, Stefan: *Middleware für evolutionäre Architekturen und Anwendung für ein kooperatives Produktionskonzept im Schienengüterverkehr*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2005
- [89] KÖNIG, Stefan ; SCHNIEDER, Eckehard: Design and Test of Configurable Agents in a Middleware for Evolutionary Architectures. In: *5th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation*. Marne la Vallée, 2004, S. 56-57

- [90] KORPELA, E. ; WERTHIMER, D. ; ANDERSON, D. ; COBB, J. ; LEBOISKY, M.: SETI@home-massively distributed computing for SETI. In: *Computing in Science Engineering* 3 (2001), jan/feb, Nr. 1, S. 78 –83. <http://dx.doi.org/10.1109/5992.895191>. – DOI 10.1109/5992.895191. – ISSN 1521–9615
- [91] KRAUSS, Stefan: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Mathematisches Institut der Universität zu Köln, Diss., 1998
- [92] KÜHNEL, C. ; LEITZKE, C. ; HOYER, R.: Evaluation of floating car observer algorithms using microscopic traffic flow simulation. In: *16th World Congress on Intelligent Transport Systems*. Stockholm, 2009
- [93] KÜHNEL, C ; V., Blees ; REUSSWIG, A.: Kundenbezogene Qualitätsmessung im Individualverkehr. In: *Internationales Verkehrswesen* 7 (2003)
- [94] KUPKE, Thorben: *Funkbasierte energieautarke Kommunikation für Eisenbahngüterzüge*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2008
- [95] LEMMER, Karsten ; OBER, Bernd ; SCHNIEDER, Eckehard: Model-based programming and diagnosis for programmable logical controllers. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Vancouver : IEEE Computer Society Press, 1995, S. 4474–4479
- [96] LUNZE, Jan: *Automatisierungstechnik*. Oldenbourg, 2003
- [97] LUO, J.: Some New Optimal Control Problems in UAV Cooperative Control with Information Flow Constraints. In: *American Control Conference IEEE, IFAC*, 2003
- [98] MAKHLOUF, I. ; BEN, S. ; CHÁVEZ GRUNEWALD, M. ; ABEL, D.: Safety Assessment of Networked Vehicle Platoon Controllers - Practical Experiences With Available Tools. In: *3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems*. Zaragoza, 2009
- [99] MURRAY, Richard M.: Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 129 (2007), Nr. 5, 571-583. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2766721>. – DOI 10.1115/1.2766721

- [100] NAGEL, K. ; SCHRECKENBERG, M.: A cellular automaton model for freeway traffic. In: *Journal of Physics* 2 (1992), S. 2221–2220
- [101] OBER, Bernd ; SCHNIEDER, Eckehard: Modellbasierte Programmierung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen. In: *39. Wissenschaftliches Kolloquium*. Ilmenau, 2004, S. 580–585
- [102] OBER, Bernhard: *Modellgestützte Synthese ereignisdiskreter Steuerungen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1999
- [103] ÖGREN, Peter ; EGERSTEDT, M. ; XIAOMING, H.: A Control Lyapunov Function Approach to Multiagent Coordination. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18 (2002), Nr. 5
- [104] ÖGREN, Peter ; FIORELLI, E. ; LEONARD, N. E.: Cooperative Control of Mobile Sensor Networks: Adaptive Gradient Climbing in a Distributed Environment. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (2004), Nr. 8, S. 1292–1302
- [105] OLFATI-SABER, R. ; FAX, J. A. ; MURRAY, R. M.: Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. In: *Proceedings of the IEEE* 95 (2007), Nr. 1, S. 215–233
- [106] ORQUEDA, O. A. ; ZHANG, X. T. ; FIERRO, R.: An Output Feedback Nonlinear Decentralized Controller for Unmanned Vehicle Coordination. In: *International Journal of Robust Control and Nonlinear Control* (2007)
- [107] OTTO, H. ; HOYER, R.: Devices-in-the-Loop Approach - Traffic Simulation meets real Devices of distributed V2I Application. In: *Devices-in-the-Loop Approach - Traffic Simulation meets real Devices of distributed V2I Application*. München, 2009
- [108] OTTO, H. ; HOYER, R.: Geocoding Approach to V2I Communication assisted Traffic Lights using Nomadic Devices. In: *16th World Congress on Intelligent Transport Systems*. Stockholm, 2009
- [109] OYAMA, S.: ITS radio communications in Japan / Hitachi Ltd. Japan, IEEE WiVEC. Version: Oktober 2007. <http://www.ieeevtc.org/plenaries/>

vtc2007fall/16.pdf, Abruf: 01.12.2010. Baltimore, MD, Oktober 2007. – Forschungsbericht

- [110] PETOVELLO, M. G.: *Real-time integration of a tactical grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation*, University of Calgary, Diss., 2003
- [111] PHAM, Hung ; TOMIZUKA, Masayoshi ; HEDRICK, J. K.: *Integrated Manoeuvring Control For Automated Highway Systems Based On A Magnetic Reference/sensing System*. <http://www.escholarship.org/uc/item/7hk255bn>. Version: 1997
- [112] PRIEMER, C.: Car2LSA - Ein Konzept für eine adaptive, dezentrale Lichtsignalsteuerung in Netzen. In: *Forum CeBIT in Motion*. Hannover, 2009
- [113] PRIEMER, C.: Concept for a decentralized adaptive traffic signal control in urban networks based on C2I-communication data and adaptive dynamic programming. In: *23rd European Conference on Operational Research (EURO XXIII)*. Bonn, 2009
- [114] QUIROGA, Lissandro M. ; WEGELE, Stefan ; ANTONI, Marc: Petri net based simulation and optimization of railway maintenance processes. In: *Symposium FORMS/FORMAT - Formal Methods for Automation and Safety in Railway and Automotive Systems*. Budapest, 2008, S. 173–184
- [115] QUIROGA, Lissandro M. ; SCHNIEDER, Eckehard: Formal based simulation of railway infrastructure condition monitoring systems. In: *ENGINEERING 2010 - World Engineering Congress and Exhibition*. Buenos Aires, Argentinien, 2010
- [116] QUIROGA, Lissandro M. ; SCHNIEDER, Eckehard: Monte Carlo simulation of railway track geometry deterioration and restoration. In: *ESREL 2010 - European Safety & Reliability Conference*. Rhodos, Griechenland, 2010
- [117] RAITHEL, Jürgen: Ein kognitiv-verhaltenstheoretisches Modell devianten Verkehrsverhaltens. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 4 (2010), April, S. 204–205
- [118] REN, W. ; BEARD, R. W.: *Distributed Consensus in Multi-Vehicle Cooperative Control*. Springer, 2008

- [119] RESEARCH AND INNOVATIVE TECHNOLOGY ADMINISTRATION (RITA): *SAE J2735–Dedicated short range communications (DSRC) message set dictionary fact sheet*. http://www.standards.its.dot.gov/fact_sheet.asp?f=72. Version: August 2006, Abruf: 01.12.2010
- [120] SAILER, R. ; WIRTH, F.: Stabilization of nonlinear systems with delayed data-rate-limited feedback. In: *European Control Conference*, 2009, S. 1734–1739
- [121] SASSE, A.: *Robuste Fahrzeugortung zur Anwendung in sicherheitsrelevanten Fahrerassistenzsystemen*. Technische Universität Braunschweig Campus Forschungsflughafen, 2010 <http://books.google.com/books?id=Hy7PjwEACAAJ>. – ISBN 9783928628587
- [122] SCHMIDT, G. ; POSCH, B.: Automatische Zusammenführung zweier Fahrzeugströme - eine Rückblende. In: *at - Automatisierungstechnik* (2010), 06, S. 317–320
- [123] SCHNIEDER, E. ; GLÄSER, Stefan ; HÖWING, F.: Automatisierungstechnische Fehleranalyse einer offenen Kommunikationsarchitektur für Kraftfahrzeuge Teil 1 und 2. In: *atp - Automatisierungstechnische Praxis* 9 und 10 (2007)
- [124] *Kapitel 6.3*. In: SCHNIEDER, Eckehard: *Methoden der Automatisierung*. Vieweg, 1999
- [125] SCHNIEDER, Eckehard (Hrsg.): *Verkehrsleittechnik*. Springer, 2007
- [126] SCHNIEDER, Eckehard ; CHOUIKHA, Mourad ; OBER, Bernd: Automatisierter Steuerungsentwurf für diskrete und kontinuierlich-diskrete Systeme. In: *at - Automatisierungstechnik* 49 (2001), Nr. 6, S. 280–289
- [127] SCHNIEDER, Eckehard ; MÜLLER, Jörg R. ; STÄNDER, Tobias: Improving System Safety Modeling in accordance to IEC 61508 by using Monte Carlo Simulations. In: *2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems*. Bari, 2009
- [128] SCHNIEDER, Eckehard ; SCHNIEDER, Lars: Axiomatik der Begriffe für die Automatisierungstechnik. In: *atp - Automatisierungstechnische Praxis* 50 (2008), Nr. 10, S. 62–73

- [129] SCHNIEDER, Eckehard ; SLOVAK, Roman: Profund: Ein integrativer Ansatz zum Entwurf verlässlicher Automatisierungssysteme. In: *atp - Automatisierungstechnische Praxis* 7 (2007), S. 40–44
- [130] SCHNIEDER, Eckehard ; WEGELE, Stefan: Automated dispatching of train operations using discrete optimisation method. In: *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik - Informationssysteme in Transport und Verkehr*. Passau, 2006, S. 117–128
- [131] SCHNIEDER, Lars ; DETERING, Stefan: Systemische Kalibrierung und Validierung von Simulationen zur Auslegung von Verkehrsassistenzsystemen. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel AAET*. Braunschweig, 2010
- [132] SCHOLL, W.: *Presseinformation – VM2010 Präsentation München*. http://www.invent-online.de/downloads/INVENT_Presseinformation_24.06.04.pdf. Version: Juni 2004, Abruf: 01.04.2012
- [133] SCHRÖDER, C.: *Hessen als Testfeld für Autos mit sechstem Sinn*. <http://www.atzonline.de/index.php;do=show/id=6438/alloc=1>. Version: 2009, Abruf: 13.11.2009
- [134] SCHROM, H. ; SCHNIEDER, Eckehard: *Feldbussystem mit minimierter Hardwarearchitektur*. Deutsches Patent- u. Markenamt, Offenlegungsschrift DE 100 34 07 A 1,
- [135] SCHROM, Harald: *Realisierung eines optimierten Feldbussystems und Modellierung mit Petrinetzen*, Institut für Verkehrssicherheit u. Automatisierungstechnik, TU-Braunschweig, Diss., 2003
- [136] SHOHAM, Yoav ; LEYTON-BROWN, Kevin: *Multiagent Systems - Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 2009
- [137] SILVA, Viviane Torres d. ; DE LUCENA, Carlos J.: Modeling Multi-Agent Systems. In: *Communications of the ACM* 50 (2007), Nr. 5, S. 103–108
- [138] SÖFFKER, D.: *Systemtheoretische Modellbildung der wissensgeleiteten Mensch-Maschine-Interaktion*. Berlin : Logos Wissenschaftsverlag, 2003

- [139] SPANOS, Demitri P.: *Distributed Gradient Systems and Dynamic Coordination*, California Institute of Technology, Diss., 2006
- [140] SPANOS, Demitri P. ; MURRAY, M. M.: Motion Planning with Wireless Network Constraints. In: *American Control Conference IEEE, IFAC*, 2005
- [141] STEIN, Christian ; SCHNIEDER, Lars: Effektives Terminologiemanagement im Requirements Engineering. In: *REConf 2010 – 9. Requirements Engineering Tagung*. Aschheim-Dornach, 2010
- [142] STRASSMANN, Burkhard: Das Autoauto. In: *Die Zeit* (2006), November, Nr. 45
- [143] SWAROOP, D. ; HEDRICK, J. K.: String Stability of Interconnected Systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* (1996)
- [144] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: Vienna Convention on Road Traffic / United Nations. Version: November 1968. <http://www.unece.org/trans/conventn/crt1968e.pdf>. 1968. – Forschungsbericht
- [145] VALK, Rüdiger: Petri Nets as Token Objects. Version: 1998. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-69108-1_1. In: DESEL, Jörg (Hrsg.) ; SILVA, Manuel (Hrsg.): *Application and Theory of Petri Nets 1998* Bd. 1420. Springer Berlin / Heidelberg, 1998, 1-24
- [146] VOIT, F. ; VOSS, H.-J. ; SCHNIEDER, Eckehard ; PRIEBE, O.: Fuzzy Control versus konventionelle Regelung am Beispiel der Metro Mailand. In: *at - Automatisierungstechnik* 42 (1994), Nr. 9, S. 400–410
- [147] VORNDRAN, Ingeborg: Unfallstatistik – Verkehrsmittel im Risikovergleich / Deutsches Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 12 2010. – Forschungsbericht
- [148] VOSS, H.-J.: *Optimale Fahrprofilausnutzung bei schienengebundenen Nahverkehrsfahrzeugen durch die Kombination von konventioneller Regelungstechnik und Fuzzy Control*. VDI, 1996
- [149] WEGELE, Stefan: Automatic dispatching of train operations using a hybrid optimisation method. In: *8th World Congress on Railway Research WCRR 2008*. Seoul, 2008

- [150] WEGELE, Stefan ; SLOVAK, Roman ; SCHNIEDER, Eckehard: Echtzeitoptimierung für die Disposition im Schienenverkehr. In: *Signal+Draht* 98 (2006), Nr. 6, S. 6–10
- [151] WEGELE, Stefan ; SLOVAK, Roman ; SCHNIEDER, Eckehard: Decision support system for optimal real-time dispatching of train operation. In: *2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Hannover, 2007
- [152] WEGENER, A. ; HELLBRÜCK, H. ; FISCHER, S. ; HENDRIKS, B. ; SCHMIDT, C. ; FEKETE, S.: Designing a Decentralized Traffic Information System - Autonomos. In: *16. ITG/GI - Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS)*, Springer, 2009, S. 309–315
- [153] WEGENER, Marco ; HÜBNER, Matthias: Anforderungen an ein Referenzmesssystem zur Untersuchung der GPS-Messqualität. In: *tm - Technisches Messen* 78 (2011), 7-8, Nr. 7-8, S. 354 – 363
- [154] WEISS, Christian: *simTD: Mit Car-to-X-Kommunikation die Zukunft der Verkehrssicherheit und Mobilität gestalten*. <http://www.simtd.de>, Abruf: 13.11.2009
- [155] WEISS, Gerhard: *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, 2000
- [156] WIKIPEDIA: *Antiblockiersystem*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Antiblockiersystem>. Version: Oktober 2010, Abruf: 16.10.2011
- [157] WIRTH, Wolfgang: Das Fundamentaldiagramm und sein Aussagegehalt. In: *Internationales Verkehrswesen* 62 (2010), Nr. 12, S. 30 – 35
- [158] XIAO, F ; L., Wand: State consensus for multi-agent systems with switching topologies and time-varying delays. In: *International Journal of Control* 79 (2006), Oktober, Nr. 10, S. 1277–1284
- [159] YUAN, H. ; VIVIAN, G. ; MARK, F. ; ZHIHUA, Q.: Cooperative Formation Flying in Autonomous Unmanned Air Systems with Application to Training. In: HIRSCH, Michael J. (Hrsg.) ; PARDALOS, R. P. M. M. P. M. Murphey (Hrsg.)

- ; GRUNDEL, D. (Hrsg.): *Advances in Cooperative Control and Optimization*, 2007, S. 203–219
- [160] ZAMBOU, Nathan ; ENNING, M. ; ABEL, D.: Longitudinal Control of Following Vehicles Within Platoon. A Model-based Predictive Approach. In: *Symposium on Advances in Automotive Control AAC*. Salerno, April 2004
- [161] ZAMBOU, Nathan ; ENNING, M. ; ABEL, D.: Nonlinear Spacing Control of Following Vehicles Within Platoon a Controlled Lagrangian Approach. In: *6th IFAC Symposium Nonlinear Control Systems*. Stuttgart, 2004
- [162] ZAMBOU, Nathan ; SCHLOSSER, A. ; ABEL, D. ; PREUSCHOFF, E. ; HAPPE, J. ; S., Deutsche: Impacts of Wireless Communication on Road Transport considering Autonomous Driver Assistance Systems for Heavy-Duty Vehicles within Platoon as an example. In: *1st International Workshop on Intelligent Transportation WIT*. Hamburg, 2004
- [163] ZHANG, F. ; GROCHOLSKY, B. ; KUMAR, V. ; MINTZ, M.: Cooperative Control for Localization of Mobile Sensor Networks. In: *Cooperative Control*, Springer, 2005
- [164] ZHOU, Kemin ; DOYLE, John C. ; KEITH, Glover: *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall, 1996
- [165] ZHU, Yongjie ; ZHEN, Yongling ; ÖZGÜNER, Ümit: Waypoint Selection in Constrained Domains (for Cooperative Systems). In: PARDALOS, P. M. (Hrsg.) ; MURPHEY, R. (Hrsg.) ; GRUNDEL, D. (Hrsg.) ; HIRSCH, Michael J. (Hrsg.): *Advances in Cooperative Control and Optimization*. Springer, 2007, S. 191–202

Der derzeitige Straßenverkehr zeichnet sich durch unterschiedliches und deviantes Fahrzeug- bzw. Fahrerverhalten aus, dessen Konsequenz Phänomene wie Staus und Verkehrsunfälle sind. Die Homogenisierung des Fahrzeugverhaltens soll diese negativen Phänomene eliminieren und durch autonom fahrende Fahrzeuge, die untereinander kommunizieren können, realisiert werden.

Diese Dissertation behandelt die Konzeption eines solchen zukünftigen automatisierten Straßenverkehrs für Autobahnen auf Basis von fahrzeuglokalen Entscheidungsmechanismen und Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation.



Matthias Hübner (Jahrgang 1980) studierte Automatisierungstechnik mit der Vertiefungsrichtung Systems Engineering an der Fachhochschule Nordostniedersachsen in Lüneburg. Anschließend belegte er das Ergänzungsstudium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität Bremen in der Vertiefungsrichtung Automatisierungstechnik. Diese Dissertation entstand während seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig.